

추계학적 모의유량을 이용한 한강수계 용수공급시스템의 장기지속가뭄 영향 평가

Assessing Sustained Drought Impacts on the Han River Basin Water Supply System Using Stochastic Streamflows

차형선* / 이광만** / 정관수***

Cha, Hyeung Sun / Lee, Gwang Man / Jung, Kwan Sue

Abstract

The Uncertainty of drought events can be regarded as supernatural phenomena so that the uncertainty of water supply system will be also uncontrollable. Decision making for water supply system operation must be dealt with in consideration of hydrologic uncertainty conditions. When ultimate small quantity of precipitation or streamflow lasts, water supply system might be impacted as well as stream pollution, aqua- ecosystem degradation, reservoir dry-up and river aesthetic waste etc. In case of being incapable of supplying water owing to continuation of severe drought, it can make the damage very serious beyond our prediction. This study analyzes comprehensively sustained drought impacts on the Han River Basin Water Supply System. Drought scenarios consisted of several sustained times and return periods for 5 sub-watersheds are generated using a stochastic hydrologic time series model. The developed drought scenarios are applied to assess water supply performance at the Paldang Dam. The results show that multi-year drought events reflecting spatial hydrologic diversity need to be examined in order to recognize variation of the unexpected drought impacts.

Keywords : drought scenarios, water supply performance, stochastic hydrologic time series model

요 지

가뭄의 불확실성은 우리가 관리할 수 있는 범위를 넘어서는 현상으로 용수공급시스템의 불확실성 역시 우리가 제어할 수 있는 한계를 벗어날 수 있다. 따라서 수자원 시설물 운영에 필요한 의사결정은 여러 가지 불확실한 상황을 고려하여 다루어져야 한다. 특히 극단적 강우부족이나 저유량 상황이 장시간 지속되는 경우에는 수자원 공급에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 하천오염, 수생태계 파괴, 저수지 고갈, 용수공급 장애 그리고 하천미관의 악화 등이 포함될 수 있다. 그중 극한가뭄의 지속으로 인해 용수공급의 중단과 같은 사태가 발생할 경우 피해한계를 예측할 수 없는 매우 심각한 결과가 초래될 수 있다. 이런 측면을 고려하여 본 연구는 장기지속가뭄을 포함하여 극한 가뭄사상에 대한 한강수계 용수공급 시스템의 가뭄 영향을 종합적으로 평가하였다. 이를 위해 5개 소유역에 대한 추계학적 수문시계열모형을 이용하여 월 유량 기준의 지속기간별, 재현기간별 가뭄 시나리오를 개발하여 팔당댐을 기준지점으로 하는 한강유역 용수공급 시스템에 적용하여 용수공급의 이행도를 평가하였다. 평가결과 예기치 못한 가뭄의 영향을 알기 위해서는 수문학적 다양성을 반영하는 장기지

* K-water 경북물관리센터 팀장 (e-mail: chasun@kwater.or.kr)
Gyeongbuk Regional Reservoir Management & Operations Center, Kwater

** 교신저자, K-water 연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr)
Corresponding Author, Korea Institute of Water & Environment, Kwater

*** 충남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)
Department of Civil Engineering, Chungnam National University

속가뭄에 대한 평가가 필요하다.

핵심용어 : 가뭄 시나리오, 용수공급이행도, 추계학적 수문시계열 모형

1. 서론

자연재해는 인류가 지구상에 존재하는 한 감당하고 적 응해 가야할 과제중의 하나이다. 근래 미국의 허리케인 카타리나 및 동남아시아 지역과 일본 동북부 해안에서 발생한 지진해일(쓰나미)로 인한 엄청난 인명피해와 재산손 실은 피해갈 수 없는 자연재해의 한 단면을 보여주었다. 또한 지구촌은 지구온난화에 따른 기후변화에 의해 홍수 및 가뭄 등 자연재해가 빈발하고 있다. 이에 대한 전지구 적 대비를 위해 국가간 국제공동활동이 활발히 이루어지 고 있다. 특히 지구온난화 등에 의한 기후변화는 극한 기 상사상의 발생이 예견되는데 앞으로 강도 높게 자주 발생 할 것으로 예측되고 있다. 이로 인한 영향은 한반도에서 더욱 심하게 나타날 것으로 예상하고 있어 극한 기후 사 상에 의한 가뭄 역시 중요한 과제가 되고 있다.

IPCC (2007)는 온난화 등 기후변화에 의해 영향을 받을 영역으로 물, 생태계, 식량, 해안지역 및 건강 등 5가지를 제시했다. 이중 가장 심각한 영향을 받을 것으로 예상되 는 지역은 상대적으로 물이 부족한 지역으로 나타났다. 이 에 따라 수문학적 변화, 특히 가뭄은 농업, 생태계 및 인류 건강에 큰 영향을 미칠 것으로 예상했다. 따라서 기후변화 에 대응한 물 관리의 중요성은 많은 전문가들에 의해 강조 되고 있다(Stern, 2006; Muller, 2007). 이중에서도 미국 해양기상청(NOAA)에서 선정한 20세기 최대의 자연재해 10개 중 세계 각지에서 발생한 4개의 가뭄이 상위 5위안 에 기록된 바 있듯이 가뭄은 홍수보다 그 피해와 영향력 이 인간생활 및 산업분야 등에 광범위하게 미치고 있다.

우리나라 역시 기상관측 이래 남부지역을 중심으로 겨 울~봄철에 만성적인 가뭄이 심화되고 있다. 특히 21세기 가 시작된 2001년에는 기상관측 이래 가장 극심한 가뭄과 때 이른 무더위로 신음한 바 있다. 다운년에도 강수량은 많으나 강수기간은 짧아지고 있는 추세를 보이고 있다. 최근 50년간(1954~2003) 강수일수(강수량 0.1 mm 이상) 는 감소하고, 호우일수(80 mm 이상)는 1954~1963년 기 간의 평균 1.6일/년에 비하여 1994~2003년은 2.3일/년으 로 증가추세이다. 즉 강수량은 증가하지만, 강수일수는 감 소하고 호우일수는 증가하는 추세를 보여 결과적으로 호 우와 가뭄의 발생빈도가 증가하였다(최영은 등, 2003).

기상예측과 예보시스템, 정부정책, 공공교육 및 새로운 기술의 개발 등 자연재해 예방을 위한 여러 조치들이 다방 면으로 시행되고 있음에도 이로 인한 피해는 날로 증가하 고 있다. 특히 가뭄에 대한 취약성은 전혀 개선되지 않고 있으며, 다른 자연재해와 유사한 형태로 증가하고 있는 것 으로 알려지고 있다(Changnon, 2000). 실제 전 세계적으로 가뭄은 인간에게 직접적인 영향을 미치는 자연재해 중으 서 1위를 차지하고 있다(Hewitt, 1997; Wilhite, 2000). 특 히 가뭄이 발생하는 재현기간에 대한 관심은 수문학자들 뿐만아니라 사회과학자들에게도 매우 중요한 의미를 갖 는다.

수자원 시스템 공학에서 발생빈도는 중요한 설계변수 중 하나이다. 수자원시설물의 운영기간 동안에 목적달성 에 실패확률은 어느 정도 제한적이다. 설계의 안전율은 이용 가능한 기존 기록 자료의 통계적 특성에 의존해 결 정된 것으로 실제 많은 불확실성을 포함하고 있다. 그러 나 이용 가능한 과거 기록 자료에 의한 수문통계특성의 추정은 대개 극한 가뭄 시나리오(episode)를 유추하는데 매우 중요한 한계성을 보여준다. 실제 가뭄은 그 특성상 홍수 등 기타 자연재해와는 달리 진행속도가 느리고 장기 적으로 진행된다. 그러나 대부분의 용수공급 계획은 기준 갈수년 등 1년 단위의 수문조건이나 수십년 정도의 유량 자료로 평가하는 것이 대부분이다. 이와 같은 정보의 부 족을 극복하기 위해 수문사상에 대한 추계학적 기법의 적 용은 가뭄사상과 같은 유사한 수문자료를 얻는데 매우 유 익한 방법으로 활용되고 있다(Yevjevich, 1967).

우리나라의 수도권과 같이 대규모 급수체계 지역에서 는 가뭄의 정도를 조기에 인지하고 그 진행 상황을 수자 원전문가 및 물 공급 담당 관리자뿐만 아니라 일반인들에 게 알려줄 수 있다면 가뭄에 대한 신속한 대처와 피해경 감효과를 기대할 수 있을 것이다. 아니면 예상 가능한 가 뭄시나리오를 개발하여 그 영향을 분석하고 이에 대비하 는 전략을 갖춘다면 극한가뭄의 피해를 완화시킬 수 있는 하나의 해법이 될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 장· 단 기 극한가뭄사상이 용수공급시스템에 미치는 영향에 대 해 추계학적 수문시계열모형을 이용하여 장기지속가뭄 수문시나리오를 개발하고 한강수계의 용수공급 시스템에 적용하여 가뭄적응능력을 평가하고 문제점을 분석하여

제시하고자 하였다.

2. 장기지속가뭄 분석 방법

용수공급시스템에서 재현기간과 실패위험도 추정을 더욱 어렵게 만드는 요소는 고려하고자 하는 대상시설물에 적용할 수 있는 수문시계열자료의 한계이다. 실제 유입량, 저수지 수위, 저류량, 방류량, 최소유량 및 갈수량 등 수자원 문제에 연계된 많은 요소들은 수문시계열의 재현기간이나 용수공급의 신뢰도를 평가하는데 중요한 역할을 한다. 그러나 실제 대부분의 수문자료계열은 30~50년 정도여서 장기지속가뭄의 극한가뭄 빈도를 해석할 수 있는 실측자료를 확보하기가 현실적으로 어려운 실정이다.

이에 따라 용수공급 시스템의 합리적인 운영을 위해서는 가장 현실적이고 올바른 해를 줄 수 있는 수학적 모형의 접근이 필요하다. 장기가뭄해석과 같이 상당기간의 수문시계열 자료가 필요한 경우 이용 가능한 자료의 한계로 인해 정확하지는 않더라도 근사적 해를 얻는데도 어려움이 많다. 이를 해결할 수 있는 방법 중 하나는 추계학적 수문시계열 모형을 적절히 활용하여 기존 자료의 한계이상의 영역에 대한 가뭄특성을 분석하는 것으로 특히 추계학적으로 생성된 초장기 계열을 적용할 수 있다.

추계학적 수문시계열 모형은 1960년대 이후 수자원 개발이나 용수공급 시스템 연구에 광범위하게 이용되고 있다. 특히 저수지 규모결정, 보장공급량 평가, 갈수량과 가뭄해석, 수자원시스템의 운영률 개발, 수문사상의 불확실성을 고려한 수리시설물의 이행도 평가, 기후변화가 수자원 시스템에 미치는 영향 해석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Loucks et al., 1981; Hipel and McLeod, 1994, Salas et al., 2006). 주로 AR(1) 모형을 이용하여 Run length나 최장 부족기간(longest run)의 분포 등을 해석하는데 이용되었다(Milla'n and Yevjevich, 1971). 또한 유역이 크거나 용수공급 시설이 다수인 경우 다지점 모형인 MAR (multivariate autoregressive)(Salas and Pegram, 1977)와 MARMA (multivariate autoregressive moving average) (Haltiner and Salas, 1988)가 널리 이용되어지고 있다. 일반적으로 이들 모형은 과거 기록자료의 기본 통계치를 유지할 수 있는 특징이 있다. 다만 이들 모형의 정확도는 이용하는 자료의 양이나 질에 영향을 받으며 부적절한 수문자료가 이용되어질 경우 심각한 오류를 범할 수도 있다(Oliverira et al., 1988).

이와 같이 추계학적 수문시계열 모형에 의해 개발된 수문시나리오를 이용하여 용수공급을 목적으로 하는 수자

원 시스템을 대상으로 장기 지속 가뭄에 대한 특성과 그 중요도를 평가할 수 있는 충분한 수문자료를 확보할 수 있다(정상만과 신현민, 1999). 이와 같은 장기 가뭄의 발생빈도와 중대성을 평가하기 위한 수문시나리오를 개발하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 가장 손쉬운 방법은 과거 수문자료의 계열이 충분히 길 경우에는 확률분포형을 이용하거나 확률이론을 적용하여 구할 수 있다. 또 하나의 방법은 과거 기록 자료의 통계적 특성을 이용하는 추계학적 수문시계열 모형을 적용하여 합성 수문계열을 모의하는 것이다(이광만과 고석구, 1993; Tarboten, 1995). 그러나 한강수계와 같이 이미 수문학적으로 독립된 다수의 댐들이 위치하고, 용수수요 지점이 하류에 위치하는 경우 상류의 수문자료를 다루는 문제가 복잡해진다. 예를 들면 한강수계에는 이미 10개 이상의 댐이 건설되어 있으며, 이중 저류량 조절이 가능한 대형 댐만 3개에 이른다. 또한 나머지 댐 중에서 팔당댐은 하류에 위치하지만 수도권 용수공급을 위한 기준지점 역할을 하고 있으며, 지류 유입량도 용수공급에 기여하고 있다.

이와 같은 특성은 수문학적으로나 수자원시스템 해석 측면에서 여러 가지 중요한 의미를 갖는다. 우선 수문통계학적인 하나의 변수나 계열로는 한강수계 용수공급시스템을 대표할 수 있는 결과를 얻을 수 없다. 같은 수계내에서도 어느 주어진 시점에 여러 지점에서의 수문변량은 서로 상이한 내용을 보여줄 수 있고, 유역간 수문특성의 상관성이 크지 않아 가능한 수문자료를 여러 소유역으로 분할하여 접근할 필요가 있다. 즉, 유역의 적정크기나 주요 수자원 시설물, 유역 및 하천의 특성을 고려하여 다변량(multivariate)으로 다룰 필요가 있다. 이는 또한 수자원 시스템해석에 필요한 수문시나리오 역시 해석하고자 하는 수자원 시스템의 구성요소를 고려하여 개발되어야 한다.

따라서 한강수계에서의 가뭄해석을 위한 수문시나리오는 주요 수자원 시설물의 운영과 용수공급 지점을 고려해야 하기 때문에 다지점 수문변수로 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 지속가뭄에 대한 수문시나리오를 아래와 같은 절차를 적용하였으며(이광만 등, 2008), 이를 흐름도로 나타내면 Fig. 1과 같다.

- 1) 한강수계를 대상으로 화천댐, 소양강댐, 충주댐, 충주조정지댐 및 팔당댐을 하류지점으로 하는 5개 소유역에 대한 과거 월 유량자료를 조사한다.
- 2) 조사된 5개 소유역 월 유량자료에 대한 통계분석을 실시한다.
- 3) 팔당댐 기준(소유역 유량을 모두 합한 값)의 전유역

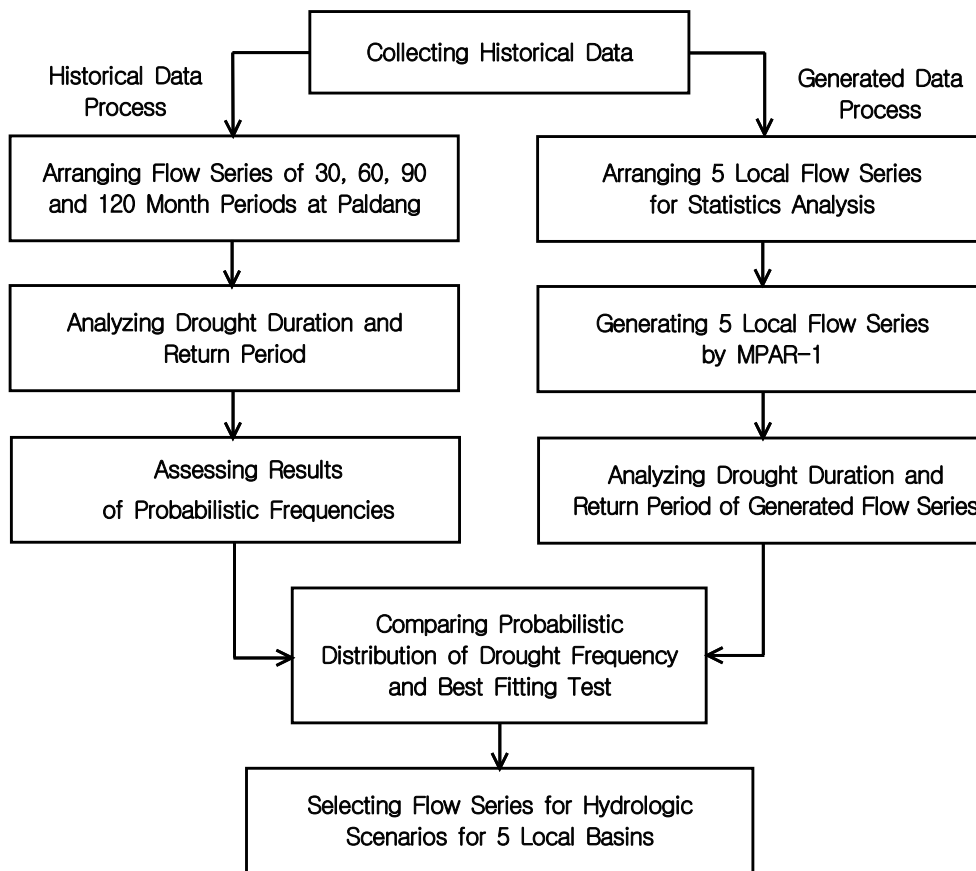


Fig. 1. The Procedure of Developing Sustained Drought Hydrologic Scenarios

의 월유량자료를 대상으로 가뭄지속기간별, 빈도별 유량을 가뭄 확률분포형을 이용하여 추정한다.

- 4) 5개 소유역의 월 유량자료를 이용하여 추계학적 수문모형을 이용하여 5개 소유역에 대한 월 단위 합성 유량을 모의한다.
- 5) 모의된 월 기간 합성유량을 대상으로 팔당댐 기준(소유역 유량을 모두 합한 값) 전체 유량을 대상으로 5개소유역 시계열상의 유량자료 계열을 대상으로 가뭄지속기간별 가뭄빈도를 해석한다.
- 6) 과거 유량자료 계열의 가뭄지속기간별, 빈도별 가뭄 유량과 합성유량의 가뭄지속기간별, 빈도별 가뭄유량을 비교하여 합치여부를 판단함으로써 합성유량 계열의 효용성을 검증한다.
- 7) 모의 유량 계열을 대상으로 개발된 가뭄지속기간별, 재현빈도별 시나리오를 대상으로 한강수계 용수공급시스템의 이행도를 평가한다.
- 8) 가뭄지속기간별, 재현기간별 용수부족 추세를 분석하고 이를 이용하여 지속가뭄에 대한 용수부족량을 추정할 수 있는 평균 개념의 간접 경험식을 제공한다.

3. 장기지속가뭄 수문시나리오 개발

3.1 추계학적 수문모형

본 논문에서는 적용대상유역의 규모와 용수공급시스템을 고려하여 여러 지점의 수문량을 시계열로 모의하기 위해 MPAR(Multivariate Periodic Auto-Regressive Model)을 적용하였다. 이 모형에 대한 기초이론은 우선 n 개의 지점에서 수문자료가 이용 가능한 범위내의 주기수문계열을 충족시키는 경우로 우선 주기성 시계열 자료의 정규화를 위해 변환하면 다음과 같다.

$$z_{\nu,\tau} = \frac{y_{\nu,\tau} - \hat{\mu}_{\tau}}{\hat{\sigma}_{\tau}} \quad (1)$$

여기서, $\hat{\mu}_{\tau}$ 와 $\hat{\sigma}_{\tau}$ 는 각각 μ_{τ} 와 σ_{τ} 의 추정치이며, 따라서 $z_{\nu,\tau}$ 계열은 음수와 양수 모두를 갖는다. 제시된 방법으로 정규화변환을 한 후 일반적인 시계열 자료의 모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$y_{\nu,\tau}^{(i)} = \mu_{\tau}^{(i)} + \sigma_{\tau}^{(i)} z_{\nu,\tau}^{(i)} \quad (2)$$

여기서, $y_{\nu,\tau}^{(i)}$ 은 시간격 τ , 년 ν , 지점 i 에서 본래의 주기수문계열을 나타낸다. $\mu_{\tau}^{(i)}$ 와 $\sigma_{\tau}^{(i)}$ 는 시간격 τ 와 지점 i 에서의 주기평균과 표준편차이고 $z_{\nu,\tau}^{(i)}$ 는 $y_{\nu,\tau}^{(i)}$ 의 표준형이다. 또한 $\tau=1, 2, \dots, \omega$ 이며 여기서 ω 는 일년 내 시간격의 개수로서 전지점에 대해 편의상 동일하다고 가정한다. $\nu=1, \dots, N$ 이고 N 은 데이터의 연수이다. Eq. (2)는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{\nu,\tau} = \mu_{\tau} + \sigma_{\tau} Z_{\nu,\tau} \quad (3)$$

여기서, $Y_{\nu,\tau}$ 는 원소 $y_{\nu,\tau}^{(i)}$ 의 $(n \times 1)$ 벡터, μ_{τ} 는 원소 $\mu_{\tau}^{(i)}$ 의 $(n \times 1)$ 벡터, σ_{τ} 는 원소 $\sigma_{\tau}^{(i)}$ 에 대한 $(n \times n)$ 대각선 행렬이고 $Z_{\nu,\tau}$ 는 원소 $Z_{\nu,\tau}^{(i)}$ 에 대한 $(n \times 1)$ 벡터이다.

3.2 저수지시스템 연계 운영 모형

장기지속가뭄에 대한 한강수계 용수공급시스템의 평가는 앞에서의 수문시나리오 개발과 같이 한강수계에서 상류의 댐을 효과적으로 운영하고 팔당댐 유역의 지역유입량을 고려하는 시스템해석이 필요하다. 이와 같은 개념을 바탕으로 소유역의 수문특성을 고려한 장기가뭄에 대한 수자원 평가 시스템을 위하여 한강유역도를 도시하면 Fig. 2와 같다.

본 연구에서 적용하고자 하는 한강유역의 댐군 최적연계운을 위한 시스템은 화천댐, 소양강댐과 충주댐을 연계하는 3차원 모형으로 구성하고 나머지 유역은 물수지(mass balance)만 계산하는 형태로 구성할 수 있다. 즉, 이 시스템의 목적은 화천댐, 소양강댐과 충주댐을 연계운영하여 팔당댐 지점의 필요수량을 충족시키도록 하는 것이다. 한강유역에 위치한 황성댐의 방류량은 팔당댐 자체 유역의 유출량에 포함시켰다. 또한, 춘천댐, 의암댐 및 청평댐은 보와 같이 용수공급 능력이 없는 유로댐으로 처리하였다.

이수측면에서 한강유역의 저수지 시스템 운영은 용수 수요처에 수요량을 공급하고 하천 임의지점의 필요수량을 충족시키는 방향으로 운영하게 된다. 한강유역의 저수지 시스템 운영은 댐의 용수수요처에 용수를 공급하는 것 이외에도 하천에 유지용수를 공급하기 때문에 하천의 상황을 고려하여 운영된다. 따라서 본 연구에서 적용한 최적연계운영 모형은 팔당댐 지점의 의무방류량과 팔당지점의 취수량을 충족시키도록 운영하는 것이다. 이를 위하여 아래와 같이 필요수량과 공급량 사이의 편차를 최소화 하는 목적함수를 적용할 수 있다.



Fig. 2. Map of 5 Sub-catchments to Assess Extreme Drought Effects in Han River

$$OF = \text{Min} \sum_{t=1}^T (WS_t - WR_t)^2, t = 1, \dots, T \quad (4)$$

When $WS_t \geq WR_t$ then $(WS_t - WR_t) = 0$

여기서, OF 는 목적함수, t 는 운영단계를 나타내며, WR_t 는 t 시점의 팔당댐 지점에서 공급해야할 수요량이다. 이 목적함수는 용수공급 평가지점인 팔당댐 지점에 대해 적용할 수 있다. WS_t 는 t 시점의 팔당댐 상류 저수지로부터 방류된 물과 지류 유입량을 모두 합한 값이다.

제시된 목적함수에 부합되도록 댐을 운영하기 위해서는 상태변수의 변화를 시간에 따라 추적해야 한다. 이는 전 단계의 운영 결과에 따라 변하는 시스템의 상태를 파악해야 다음 단계의 운영을 할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 적용한 상태방정식은 저류량을 상태변수로 하여 다음과 같이 정의하였다.

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + I_{i,t} - E_{i,t}(X_{i,t}, X_{i,t+1}) - U_{i,t} \quad (5)$$

for $i = 1, \dots, N$

여기서, t 와 $t+1$ 은 t 운영단계의 초기 및 말기를 나타내며, i 는 댐을 나타낸다. $X_{i,t}$ 는 i 번째 저수지의 운영단계 t 에서의 저류량, $I_{i,t}$ 는 i 번째 저수지의 운영단계 t 에서의 유입량, $E_{i,t}$ 는 i 번째 저수지의 운영단계 t 에서의 증발손실량, $U_{i,t}$ 는 i 번째 저수지의 운영단계 t 에서의 방류량을 나타낸다. 댐의 손실량은 수면증발량이나 댐체의 누수량 등이 있다.

최적화 모형에 의한 소양강댐과 충주댐의 최적 연계운영에 필요한 저류량과 방류량의 제약조건은 다음과 같다.

$$X_{i,t}^{\min} \leq X_{i,t} \leq X_{i,t}^{\max} \quad (6)$$

$$U_{i,t}^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,t}^{\max} \quad (7)$$

$$X_{i,t} \geq 0, U_{i,t} \geq 0 \quad (8)$$

여기서, $X_{i,t}$ 는 운영단계 t 에서 i 댐의 저류량을 나타내며, $X_{i,t}^{\min}$ 과 $X_{i,t}^{\max}$ 는 운영단계 t 에서 i 댐 저류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. $U_{i,t}$ 는 운영단계 t 에서 i 댐의 방류량을 나타내며, $U_{i,t}^{\min}$ 과 $U_{i,t}^{\max}$ 는 운영단계 t 에서 i 댐 방류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. Eq. (8)은 저류량과 방류량은 음수가 아닌 양수가 되어야 한다는 비음 조건(non-zero)을 나타낸다.

3.3 장기지속가뭄 수문시나리오 개발

본 연구에서는 5개 소유역에 대한 다지점(multi-site) 유량계열을 모의하였다. 모의방법은 Fig. 1에서 제시하고 있는 절차를 따랐다(이광만 등, 2008). 이때 적용된 유량자료계열은 수자원장기종합계획(건설교통부, 2006)에서 사용한 1968~2003년(36년간)의 월유량자료계열을 활용하였다. 이들 유량을 대상으로 적용대상유역구간의 최하류인 팔당댐을 기준으로 재현기간별, 지속기간별 확률갈수량과 100년빈도 확률밀도분포곡선은 Figs. 3 and 4와 같다.

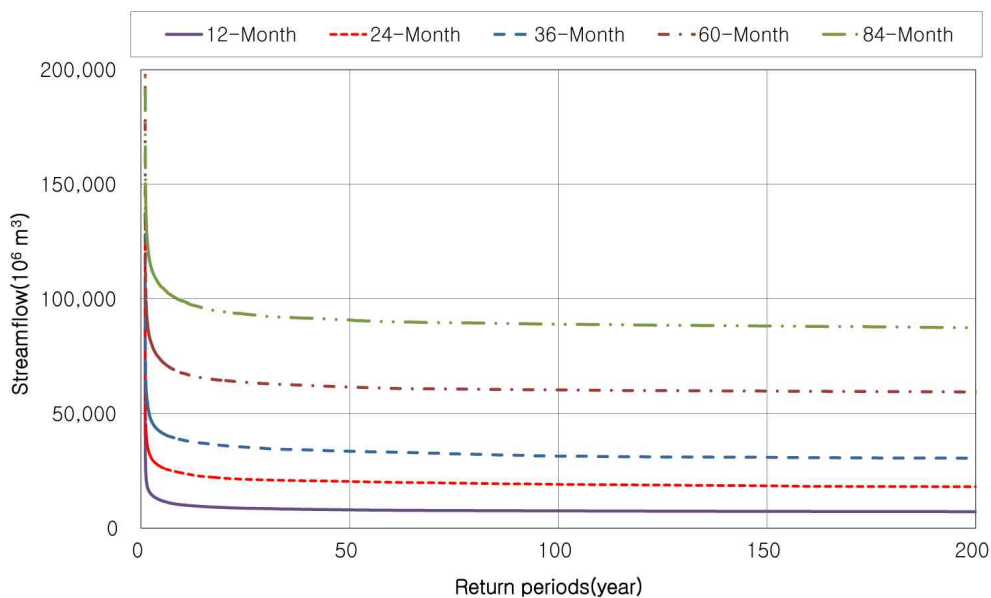


Fig. 3. Probability Distribution Curves of Reference Streamflows (sum of 5 sub-catchment flow) for Each Drought Period at the Paldang Dam

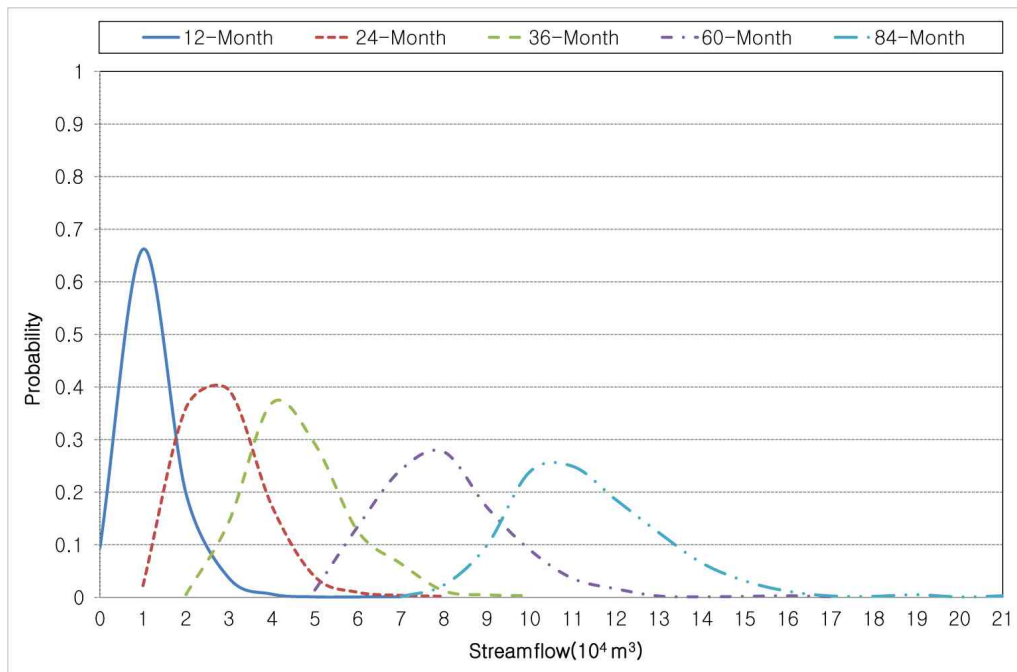


Fig. 4. Probability Density Curves of Reference Streamflows for Each Drought Duration at Paldang Dam with 100-year Return Period

Table 1. Summary of Selected Drought Scenarios for Water Supply System Assessment in Han River Basin

Drought duration (month)	Return period (year)	Scenario (number)
12	10, 25, 50, 100, 200	9
24	10, 25, 50, 100, 200	9
36	10, 25, 50, 100, 200	9
60	10, 25, 50, 100, 200	9
84	10, 25, 50, 100, 200	9

실제 수문사상은 시간과 공간적으로 동일한 것은 없으며 과거유량자료 역시 앞으로 같은 사상이 반복해서 발생할 확률은 없다고 볼 수 있다. 이런 특성을 고려하여 본 연구에서 제시하는 수문시나리오는 유역의 소유역간 유량변동성을 그대로 반영할 수 있는 방법을 택하고 있다. 한강수계 수자원 시스템의 장기지속가뭄에 대한 이행도 평가를 위해 수문시나리오의 선정은 Fig. 1의 수문빈도 해석의 역순에 의한다. 즉, 팔당댐 지점에서의 유량 합을 기준으로 빈도분석을 하고 이때 가뭄지속기간별, 재현기간별로 결정된 유량을 대상으로 역으로 소유역별 유량계열을 찾는 것이다. 가뭄지속기간은 분포모형 검증에서 적용된 가뭄지속기간 내에 해당하는 12, 24, 36, 60 및 84개월로 하였다. 이는 장기지속가뭄기간을 결정하기 위해 사전에 모의해 본 결과 120개월 이상 지속기간이 길어질수

록 댐의 저류효과 등으로 상대적 용수공급부족량은 감소하고 있어 최장 84개월 지속기간에 대하여 분석하기로 하였다. 각각의 조건에 대하여 수문시나리오를 개발하는 경우의 예는 Table 1과 같다.

Eq. (3)에 근거한 MPAR-1모형(Salas et al., 2006)을 이용하여 월단위 1,000년의 유량자료를 모의하였다. 이를 대상으로 Table 1에서 제시된 조건별 장기지속가뭄 수문시나리오를 도출하였으며, 각각의 개별 수문시나리오의 가뭄시작 기준월은 Table 2와 같다. 즉 연단위 계열이 아닌 월 시계열 상에서 가뭄기간을 정하고 있다. 따라서 같은 지속기간이나 재현기간에 대해서는 각각의 수문시나리오는 5개 소유역에 대하여 전혀 다른 수문특성을 가지고

Table 2. Drought Beginning Month of Each Drought Scenario

Period (month)	Return period	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
12	10 yr	Feb	Sep	Apr	Mar	May	Mar	May	Nov	Jun
	25 yr	Apr	Dec	Aug	Aug	Dec	Jun	Jun	Sep	Dec
	50 yr	Mar	Mar	Mar	Jan	Sep	Jan	Apr	Jan	July
	100 yr	Dec	Mar	Dec	Nov	Oct	Dec	Aug	Feb	Dec
	200 yr	Dec	Jan	Feb	Nov	Feb	Jan	Nov	Feb	Dec
24	10 yr	Mar	Sep	Sep	July	Nov	Apr	Jan	Aug	Sep
	25 yr	Jun	Aug	Nov	Feb	Feb	Jan	Dec	Jun	May
	50 yr	Feb	Dec	Feb	Oct	Apr	May	Apr	Aug	July
	100 yr	Dec	Dec	Nov	Nov	Aug	Oct	May	Aug	Nov
	200 yr	Aug	Dec	July	Jun	Nov	Dec	Aug	July	July
36	10 yr	Jun	Aug	Sep	Feb	Nov	May	Feb	Oct	Oct
	25 yr	July	Oct	Jun	July	Oct	Jan	Jun	Oct	Oct
	50 yr	May	Dec	Jan	Oct	Feb	Apr	May	Mar	May
	100 yr	May	Dec	Nov	Jan	Apr	Sep	Jun	Apr	Apr
	200 yr	Dec	Nov	Dec	Feb	Oct	Jan	Jun	Dec	Mar
60	10 yr	Jun	Dec	May	Nov	May	Aug	May	Mar	Feb
	25 yr	Dec	Oct	July	July	Sep	Jan	Dec	Jun	Aug
	50 yr	Jan	Feb	May	Aug	Jun	Jan	Dec	Dec	Oct
	100 yr	July	Sep	Mar	Sep	Jun	Dec	May	Feb	Oct
	200 yr	Nov	Feb	Dec	Aug	Oct	July	Mar	Apr	Dec
84	10 yr	May	Mar	Sep	July	Dec	Oct	May	Sep	Oct
	25 yr	Aug	May	Nov	Aug	Jun	Jan	Oct	May	Jun
	50 yr	Jun	Apr	Aug	Oct	Mar	Mar	Sep	Apr	May
	100 yr	Mar	Nov	Apr	Aug	July	July	Jun	July	July
	200 yr	Mar	Dec	Nov	Jun	May	Oct	July	Aug	Sep

고 있다고 할 수 있다. 이와 같은 방법은 유량의 정상상태의 자료계열을 의미하며 결과적으로 Monte Carlo 모의 효과를 기대할 수 있다.

이런 접근방법은 소유역간 수문의 변동성을 반영하기 위한 것으로 어느 지속기간에 소유역 유량의 합이 같다고 하여도 유량의 소유역 분포에 의한 용수공급 평가 결과는 다양한 편차를 보이게 된다. 따라서 하나의 선택된 재현빈도에 해당하는 수문시나리오는 그 사상에 해당하는 하나의 값을 의미하는 것이지 모든 가능성을 대표할 수 없다. 결국 한강수계와 같이 여러가지 용수공급시설이 개발되어 있고 대유역인 경우 장·단기지속가뭄 수문시나리오는 용수공급 시스템의 단편적 평가는 가능하게 해도 전체적인 확정적 평가는 불가능하다. 따라서 다지점 수문시나리오의 경우 똑 같은 현상이 자연계에서 발생할 수 없기 때문에 용수공급의 불확실성과 오차를 포함하게 된다.

4. 한강수계 장기지속가뭄 영향 분석

4.1 용수공급 시스템 평가지점

한강수계의 화천이나 소양, 충주댐은 국내에서 대규모에 속하는 댐들로 수문조절기능이 매우 크다. 결국 수자원시스템의 구성요소나 용수공급 측면에서 한강유역의 수문학적 측면의 유역구분은 크게 화천댐, 소양강댐, 충주댐, 충주조정지댐 그리고 나머지 팔당댐 유역으로 구분해 볼 수 있다. 이와 같은 유역구분 개념도는 수자원 평가에서 수문자료 계열과 직접적으로 연관되며 모든 수문자료의 구성이 이들 시스템에 맞추어져야 한다는 것을 의미한다. 따라서 이후 모든 입력자료의 계열은 팔당댐을 제외 지점으로 하는 5개 소유역으로 구분하여 적용하였다.

적용 대상인 한강수계에는 2개의 다목적 댐과 1개의 대규모 댐이 개발되어 중·하류부에 위치한 수도권 지역을

Table 3. Water Demand Scenarios

Purpose	Demand type	Scenarios
Domestic water	High demand	Reflection of the present declining patten of water demand and maximum reducing volume 50%
	Standard demand	Reflection of the present declining patten of water demand and maximum reducing volume 70% (considering ministry of environment "demand management plan")
	Low demand	Reflection of the present declining patten of water demand and maximum reducing volume
Industrial water	High demand	Demand for 4% economic growth
	Standard demand	Demand for 3.5% economic growth
	Low demand	Demand for 3% economic growth
	High demand	Maximum sustainable paddy area for food security - agricultural area in 2013 : $1,773 \times 10^3$ ha (paddy : $1,100 \times 10^3$ ha, upland : 673×10^3 ha)
Agricultural water	Standard demand	Reflection of the plan considering present agricultural environment - agricultural & farming area comprehensive countermeasures (2004, ministry of agriculture) - agricultural area in 2013 : $1,731 \times 10^3$ ha (paddy : $1,058 \times 10^3$ ha, upland : 673×10^3 ha)
	Low demand	Reflection of declining patten of paddy area by opening the market to rice imports - application of estimated figures in agricultural outlook 2005 (2005, KERI) (advanced country, tariff for 5 years, increasing trq by 8%) - agricultural area in 2013 : $1,638 \times 10^3$ ha (paddy : $1,004 \times 10^3$ ha, upland : 634×10^3 ha)

대상으로 용수공급을 하고 있다. 따라서 이들 수자원 시스템의 운영목적은 용수공급을 최우선으로 하며 이 시스템의 기능향상과 용수공급 최대화를 위하여 연계 시스템으로 평가되고 있다. 특히 장기가뭇과 같은 극한 사상에 대한 대처능력을 높이기 위해서는 시스템간 연계가 필수적이다.

남한강에 위치한 충주댐과 북한강에 위치한 소양강댐의 방류량은 팔당댐 상류의 양수장과 취수장에 의해 일부 취수되고 대다수는 팔당댐으로 유입되어 하류로 방류된다. 충주댐과 소양강댐은 병렬저수지군 형태로 연계운영을 위해서는 한강수계의 하류지점을 평가지점으로 선정해야 한다. 한강 하류에서 댐군 운영의 제어지점으로 사용되고 있는 곳은 한강대교와 팔당댐 지점이 있다. 한강대교 지점은 주로 홍수조절을 위한 제어지점으로 팔당댐은 이수분석의 기준지점으로 사용되고 있다. 실제 팔당댐의 책임방류량은 묘대이앙기에 $138 \text{ m}^3/\text{s}$, 기타 시기에는 $124 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 하회하지 않는 유량으로 설정되어 있다.

이와 같이 팔당댐 지점에서는 시기별로 의무방류량이

설정되어 있기 때문에 용수공급량을 평가하여 연계운영의 효과를 평가할 수 있는 지점으로 사용이 가능하다. 팔당댐 지점을 대상으로 필요수량 충족률과 유행안정도를 평가하기 위해서는 평가지점에서 물수지 분석이 필요하다. 물수지 방정식은 일반적으로 아래와 같이 상류 유입량, 중간 취수량, 하류 방류량, 저류량의 변화 등으로 구성된다.

$$D_R = U_I - I_D - \Delta S_I \tag{9}$$

여기서, D_R 은 하류 방류량, U_I 는 상류 유입량, I_D 는 중간 취수량, ΔS_I 는 저류량의 변화를 나타낸다. Eq. (9)을 사용하여 필요수량 충족률을 평가하기 위해서는 평가지점의 필요수량을 산정해야 한다. 평가지점의 필요수량은 다음과 같다.

$$WR = I_D + RD_R \tag{10}$$

여기서, RD_R 은 평가지점 하류의 최소요구량을 나타낸다. 본 연구에서는 용수공급 지점에서의 물수지 분석을 위해 5개 소유역의 개별 수요와 팔당댐 하류부의 전체 수요를 고

려하는 방법으로 적용하였다. 해석방법은 3차원의 저수지 시스템 특성과 문제의 복잡성을 고려하여 Eqs. (4)~(8)을 모형으로 개발하고 IDP (Labadie, 1988)를 이용하였다.

4.2 용수수요 시나리오

2006년에 수정 보완된 수자원장기종합계획(국토해양부, 2006)에서는 장래 우리나라의 물 수요를 보다 합리적으로 추정하기 위하여 방법론과 추정과정에서 계획수립 이해 관계자들의 공감대 형성을 기반으로 추정방법을 선정하였다. 생활용수는 최근의 1인 1일당 물사용량 감소를 반영하기 위한 시계열 모형을 사용하였으며, 공업용수는 생 산품 제조에 따른 물 사용량을 반영하기 위해 생산액당 원단위 모형을 사용하였다. 그리고 농업용수는 경지면적에 따라 물 사용량을 산정하였고, 하천유지용수는 '01년 계획에서 산정된 수질보전 또는 평균갈수량을 이용하였다. 장래 사회·경제 전망의 불확실성과 수요추정에 이용되는 자료의 한계를 고려하여 물 수요량을 고수요, 기준수요, 저수요 시나리오 설정 후 수요량 추정을 산정하였다. 각 용수에 대한 시나리오는 Table 3과 같다.

2006년 수자원장기종합계획에서는 장래 수요 시나리오를 저수요, 기준수요 및 고수요로 구분하여 추정하였다. 추정년도는 2011, 2016 그리고 2020년으로 하여 부문별로 추정하였다. 본 연구에서는 장·단기지속가뭄에 의한 한강수계 용수공급 현황을 분석하기 위한 것으로 2011년 기준수요만을 적용대상으로 하였다. 수요량은 수자원장기 종합계획에서 적용하고 있는 중권역을 기반으로 저수지 시스템의 5개 소유역 지배면적으로 부문별 수요량을 월별로 적용하였다. 이 경우 한강수계의 연간 수요량은 생활용수는 전체 33억 m^3 로 추정하였고 공업용수와 농업용수는 각각 8억과 16억 m^3 으로 추정하였다. 따라서 전체 57억 m^3 의 용수수요를 적용하였다. 하천유지용수는 댐에서의 최소방류량으로 고려하였다.

4.3 한강수계 용수공급 시스템의 장기지속가뭄 평가

장기지속가뭄을 포함한 극한 가뭄사상의 수문시나리오에 대한 한강수계 용수공급 시스템 평가는 화천, 소양, 충주, 충주조정지 및 팔당댐을 구성요소로 하고 2011년 기준수요에 대하여 적용하였다. 각 소유역에 대한 수문시나리오는 앞장에서 제시된 지속기간은 12, 24, 36, 60 그리고 84 개월로 하였다. 장기지속가뭄을 포함하는 극한 가뭄사상에 대한 평가는 극한가뭄 발생 시 용수공급 시스템의 이행도를 평가하기 위한 것으로 가뭄발생빈도는 10년, 25년, 50년, 100년 그리고 200년에 대해 모의를 실시하였다.

모의결과를 분석하면, 한강수계 용수공급 시스템의 가뭄영향 평가결과는 수문시나리오의 소유역별 유량분포에 따라 Figs. 5~9와 같이 큰 차이를 보이고 있다. 5개의 소

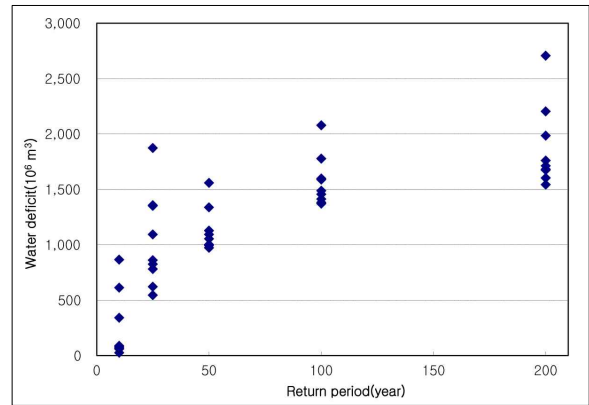


Fig. 5. Distribution of Water Deficit by Nine 12-month Sequent Drought Duration

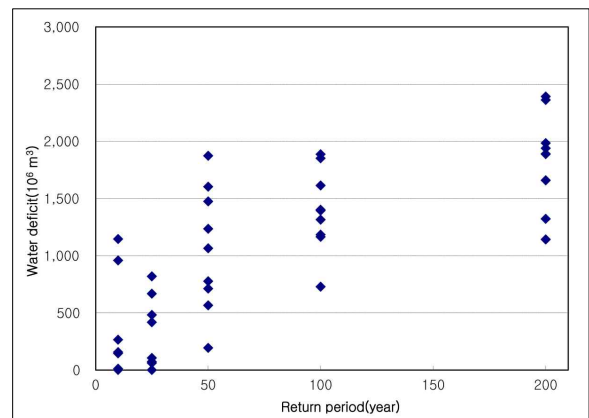


Fig. 6. Distribution of Water Deficit by Nine 24-month Sequent Drought Duration

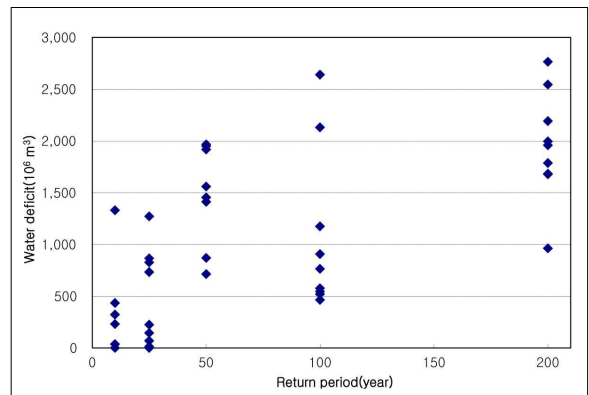


Fig. 7. Distribution of Water Deficit by Nine 36-month Sequent Drought Duration

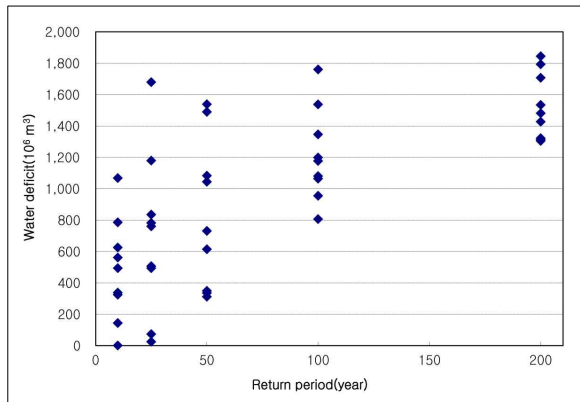


Fig. 8. Distribution of Water Deficit by Nine 60-month Sequent Drought Duration

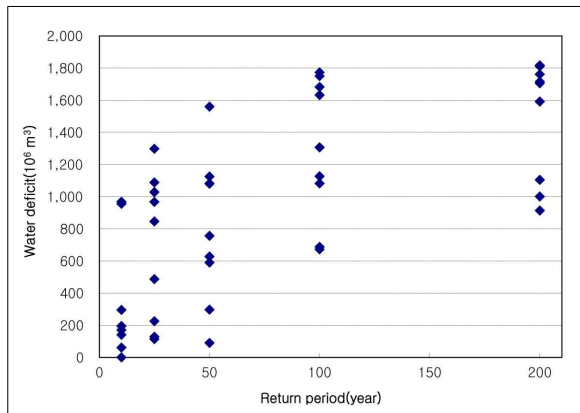


Fig. 9. Distribution of Water Deficit by Nine 84-month Sequent Drought Duration

유역과 3개의 대규모 다목적댐을 대상으로 평가하는 구상은 특정 계산조합을 정하기 어렵고 사실상 무작위성이 강한 효과를 보여주었다. 이는 과거 기준갈수량이나 수자원 장기종합계획에서의 평가와 같이 하나의 수문시계열을 이용하여 평가하는 것은 실제 가뭄발생시 용수공급 이행도의 불확실성이 크게 나타날 수 있음을 의미한다. 따라서 이들 그림들이 의미하는 것은 용수공급을 위한 수자원 시설물 계획이나 운영에 있어 가뭄평가에서 1개의 수문시나리오만을 적용하는 것은 용수공급의 안정성측면에서 차질이 발생할 수 있다.

과거 혹은 현재에도 용수공급을 위한 수자원 계획이나 시스템 해석에서 기준갈수년 혹은 과거 기록 중 최대갈수년을 정하여 평가하고 있다. 또한 저수지 운영기법에서는 과거 제한된 수문자료에 의존하고 있어 장기지속가뭄이나 극한가뭄에 대한 평가는 간과되고 있다. 이들 방법에 의한 결과들은 단일 지점의 계획에 대해서는 어느 정도 신뢰성을 확보할 수 있으나 유역이 확대되는 경우나 적용

Table 4. Water Deficit Prediction Formula according to the Return Periods

Drought duration	Formula of water deficit (x is a return period)
12-month	$y = 520.96\text{Ln}(x) - 803.55$
24-month	$y = 247.48\text{Ln}(x) - 359.86$
36-month	$y = 170.56\text{Ln}(x) - 215.34$
60-month	$y = 102.28\text{Ln}(x) - 164.69$
84-month	$y = 34.098\text{Ln}(x) + 20.852$

대상 시설물이 다수인 경우에는 유역간 수문특성에 의해 왜곡될 수 있다. 이런 결과는 수문사상의 무작위성을 감안하면 당연한 결과로서 지금까지 전혀 고려의 대상이 되지 못했다. 대체적으로 재현기간이 짧을수록 분산의 정도가 재현기간이 긴 경우보다 감소하는 경향을 보였다. 용수공급 부족량의 관점에서는 지속기간이 짧은 경우의 가뭄심도가 큰 것으로 나타나고 있다.

앞에서의 분석과 같이 장기지속가뭄에 대한 수문시나리오는 수문의 소유역간 변동성과 저수지 운영조건 그리고 수요의 분포 등에 따라 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구를 통해 해석된 결과들은 수많은 계산조합 중 하나이며 이들 값이 각각의 지속기간과 재현기간에 대한 대표치라 할 수 없다. 예를 들어 10년과 25년의 가뭄빈도에서는 일부 수문시나리오 경우 용수부족이 발생하지 않은 경우도 있으나 대부분의 경우 용수부족이 발생하는 것으로 나타났다. 25년 빈도 이상의 가뭄이 지속되는 경우 한강수계 용수공급시스템에서 용수부족은 피할 수 없을 것으로 분석되었다. 지속가뭄에 의한 용수부족량은 각 소유역과 전체유역의 유량분포에 의해 달라지겠지만 상당량의 용수부족이 발생할 것으로 판단되었다. 특히 가뭄지속기간을 24개월 이내로 짧게 선정할 경우 가뭄의 강도가 심하게 나타나고 있어 이에 대비한 전략이 필요한 것으로 판단되었다.

한편 본 연구를 통해서 한강수계 장기지속가뭄에 의한 용수공급 이행도에 대한 경향성 평가에 대한 종합적인 판단은 Fig. 10을 통하여 다음과 같이 정리할 수 있다. 이 그림은 Fig. 5~9에서 보여주고 있는 각 지속기간 및 빈도에 해당하는 9개 시나리오의 용수부족량을 연평균(연 단위 부족량) 개념으로 변환하여 도시한 것으로 각 경우별 평균 부족량의 경향을 유추해 볼 수 있다. 이 그림은 각 시나리오에 대한 평균개념의 연부족량으로 한강수계 용수공급시스템의 가뭄지속기간별, 빈도별 비부족량이라 할 수 있다.

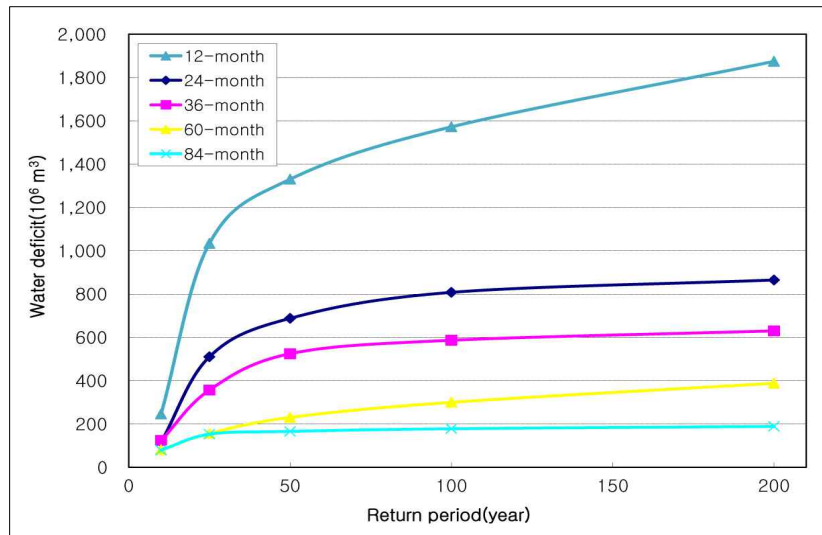


Fig. 10. Specific Water Deficit (annual mean) of the Drought Scenarios

또한 이 그림을 통해 알 수 있는 중요한 사실은 지속기간이 길어질수록 용수부족 강도는 완화되고 있다는 것이다. 이의 이유는 한강수계에는 대규모 저수지 시설이 3개가 설치되어 있으며 유입량의 대부분을 저류하여 배분하는 기능을 수행하기 때문이다. 즉 유입량의 조절방류효과가 크며 3개 저수지가 연계 운영되어 무효방류가 발생하지 않기 때문이다. 또한 가뭄기간이 길어지면서 저수지 수위가 내려가 유입량 대부분이 용수공급에 기여할 수 있는 조건이 만들어지기 때문이다. 결국 한강수계의 용수공급 시스템을 대상으로 한 장기지속가뭄에 대한 평가는 저수지의 역할이 충분히 발휘되고 있어 초장기 가뭄보다는 1~3년 전후의 극한 지속가뭄이 용수공급평가 측면에서 중요한 것으로 나타났다. 구체적으로 50년 빈도 이상에서는 연평균 5억³ 이상의 용수공급부족이 발생해 계획공급량의 10%를 넘고 있다. 지속기간 12~24개월의 경우 100년빈도 이상에서는 연평균 10억³ 이상의 용수부족이 발생할 수 있어 전체 수요량의 20%를 넘는 수준이다. 또한 평균개념의 지속기간별 재현기간별 용수부족량은 Fig. 10을 회귀분석하여 Table 4의 식을 이용, 추정할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 장기지속가뭄을 포함하여 극한 가뭄사상에 대한 한강수계 용수공급 시스템의 가뭄 영향을 종합적으로 평가하였다. 이를 위해 5개 소유역에 대한 월 유량 기준의 지속기간별, 재현기간별 가뭄 시나리오를 개발하여 팔당댐을 기준지점으로 하는 한강유역 용수공급 시스템에 적용하였다. 한강수계 용수공급시스템의 경우 장·단

기가뭄평가 결과, 용수부족은 수문시나리오의 소유역별 유량분포에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 5개의 소유역과 3개의 대규모 다목적댐을 월 단위로 평가하는 구상은 특정 계산조합을 정하기 어렵고 사실상 무작위성이 강한 효과를 보여주었다. 재현기간이 길어질수록 절대 용수부족이 크게 발생하고 있으나 용수부족량 증가추세는 급격히 감소하였다.

연평균개념의 용수공급 부족량은 지속기간 12개월이 월등히 가뭄심도가 크게 나타나고 있으며, 24개월과 36개월의 경우도 큰 부족을 보여주고 있다. 따라서 한강수계의 현재와 같은 용수공급 시스템이 2011년 기준수요를 공급하는 조건에서는 12개월 기간의 가뭄심도에 대한 영향과 36개월 이내의 장기지속가뭄에 대한 상세한 평가가 이루어져야 할 것으로 나타났다.

지속기간이 길어질수록 용수부족 강도가 완화되는 것은 한강수계 3개 대규모댐에 의해 유입량의 배분기능이 적절히 이루어지고 있는 것을 알 수 있어 현재의 용수공급 시스템이 장기지속가뭄대처에 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 나타났다.

또한 온난화와 이상기후에 대비한 극한 가뭄사상의 불확실성에 대비하기 위해서는 현재 적용되고 있는 기준갈수년이나 과거 일정기간 유량자료만으로 용수공급능력을 평가하는 방법은 개선이 필요한 것으로 확인되었다.

참고문헌

이광만, 고석구 (1993). “저수지군으로부터 기대편의 산정을 위한 Monte Carlo 기법의 간략화.” 한국수문학회는

- 문집, 한국수문학회, 제26권, 제2호, pp. 89-97.
- 이광만, 차형선, 이승윤 (2008). “한강수계 장기 가뭄 수문시나리오 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제6호, pp. 629-641.
- 정상만, 신현민 (1999). “추계학적 방법에 의한 한밭의 특성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제2호, pp. 197-210.
- 최영은, 민승기, 권원태 (2003). “20세기 후반 한반도 극한기온 사상의 변화 추이.” **대한지리학회논문집**, 대한지리학회, pp. 79-82.
- 건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획.
- Changnon, S.A. (2000). “Reactions and responses to recent urban droughts.” *Physical Geography*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-20.
- Haltiner, J.P., and Salas, J.D. (1988). “Development and testing of a multivariate, seasonal ARMA(1,1) model.” *J. Hydrol.*, Vol. 104, pp. 247-272.
- Hewitt, K. (1997). Regions at risk: A geographical introduction to disasters, Addison-Wesley Longman, U.K.
- Obasi, G.O.P. (1994). “WMO’s role in the International Decade for Natural Disaster Reduction.” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 75, No. 9, pp. 1655-1661.
- Hipel, K.W., and McLeod, A.I. (1994). “Time series modeling of water resources and environmental systems.” *Developments in Water Science*, Vol. 45, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- IPCC (2007). The Synthesis Report, Adoption and approval at the 27th Session of the IPCC, November 12-16, 2007, Valencia, Spain.
- Labadie, J.W. (1988) Dynamic programming with the microcomputer : program CSUDP, Fort Collins, Co.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. (1981). *Water resource systems planning and analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Millan, J., and Yevjevich, V. (1971). “Probability of observed droughts.” Hydro. Paper 50, Colorado State University, Fort Collins, Colo.
- Muller, M. (2007). “Policy Brief 5: Climate change adaptation and integrated water resources management : An initial overview.” Global Water Partnership Technical Committee.
- Oliveira, G.C., Kelman, J., Pereira, M.V.F., and Stedinger, J.R. (1988). “A representation of spatial cross correlations in large stochastic seasonal streamflow models.” *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 5, pp. 781-785.
- Salas, J.D., Sveinsson, O.G., Lane, W.L., and Frevert, D.K. (2006). “Stochastic Streamflow Simulation Using SAMS-2003.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 112-122.
- Salas, J.D., and Pegram, G.G.S. (1977). “A seasonal multivariate multilag autoregressive model in hydrology.” Proc., 3rd Int. Symp. of Theoretical and Applied Hydrology, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., pp. 125-145.
- Salas, J.D., Sveinsson, O.G., Lane, W.L., and Frevert, D.K. (2006). “Stochastic Streamflow Simulation Using SAMS-2003.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 112-122.
- Stern, N. (2006). “The economics of climate change: The Stern Review.” HM Treasury, U.K.
- Tarboten, D.G. (1995). “Hydrologic scenarios for severe sustained drought in the southwestern United States.” *Water Resour. Bull.*, Vol. 31, No. 5, pp. 803-813.
- Wilhite, D.A. (2000). “Drought as a natural hazard: Concepts and definitions.” *Drought: A global assessment*, Vol. 1, D.A. Wilhite, ed., Routledge, New York, pp. 1-18.
- Yevjevich, V.M. (1967). “An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts.” Hydrol. Paper 23, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.

논문번호: 11-133	접수: 2011.12.19
수정일자: 2012.01.27/03.05	심사완료: 2012.03.05