

저수지 가뭄감시를 위한 물공급능력지수의 개발

Development of Water Supply Capacity Index to Monitor Droughts in a Reservoir

이 동 루* / 문 장 원** / 이 대 희*** / 안 재 현****

Lee, Dong-Ryul / Moon, Jang-Won / Lee, Dae-Hee / Ahn, Jae-Hyun

Abstract

The efficient management strategies of reservoirs in periods of drought event are an essential element for drought planning. A Water Supply Capacity Index (WSCCI) has been developed for the evaluation and effective monitoring of the supply capacity of a reservoir during a drought event. The WSCCI is a measure of the duration that a reservoir can supply a required demand under the worst drought condition. The WSCCI is not only a useful standard to refer to when making decisions on reservoir operations in a period of drought, but it can be also applied for setting the drought trigger in water demand sites supplied from the reservoir. The correlation between the standardized WSCCI and existing drought indices such as PDSI, SPI and SWSI has been analyzed to the applicability of WSCCI.

keywords : drought index, drought planning, Water Supply Capacity Index (WSCCI), reservoir operation

요 지

가뭄기간의 효율적인 저수지 운영은 가뭄계획에서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 가뭄기간에 저수지의 용수공급능력을 모니터링 할 수 있는 새로운 가뭄지수로서 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCCI)를 개발하였다. WSCCI는 극심한 기상조건하에서 각 저수지가 수요량에 대해 어느 정도 기간 용수를 공급할 수 있는가를 평가할 수 있는 정량적 지표이다. WSCCI는 가뭄기간의 저수지 운영을 위한 의사결정에 대한 유용한 정보를 제공하고, 저수지에서 용수를 공급받는 지역의 가뭄단계 설정에 활용될 수 있다. 표준화된 WSCCI와 기존에 널리 이용되고 있는 PDSI, SPI, SWSI와 비교 분석함으로써 WSCCI의 유용성을 확인하였다.

핵심용어 : 가뭄지수, 가뭄계획, 물공급능력지수, 저수지 운영

1. 서 론

가뭄은 반복적으로 발생하는 정상적인 기후 특성으로서 미래에도 계속하여 나타날 것이다. 가뭄에 의한

물 부족 피해의 정도는 시대와 상황에 따라 다르게 나타나지만 과거와 현재에도 가뭄은 여전히 우리를 괴롭히고 있는 대표적인 자연 재난의 하나이다. 빈번한 가뭄과 함께 용수수요의 증가, 수자원 개발의 한계, 기후

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyenggi, 411-712, Korea
(e-mail : dryi@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원

*** 삼안건설기술공사 수자원부 과장

**** 서경대학교 토목환경공학과 교수

변동 등은 우리 사회의 수자원 시스템이 가지고 있는 용수공급능력의 안정성을 더욱 취약하게 하고 있다.

가뭄계획은 미래에 예상되는 물 부족의 위험도를 경감하기 위해 수립해야하는 대책으로서 한정된 수자원에서 공급의 안정성을 최대한 향상시키기 위한 사회·공학적인 노력이라 할 수 있다. 가뭄계획에서 가장 중요한 요소는 가뭄관리자의 대책 수립을 위한 의사결정을 지원할 수 있는 시공간적인 가뭄상황 정보, 적절한 가뭄단계의 설정과 각 단계에 따른 실행대책 등이라 할 수 있다.

시공간적인 가뭄상황의 파악은 가뭄의 정도를 정량화하여 제시하고 있는 가뭄지수들을 이용하여 수행될 수 있다. 지금까지 제시된 대표적인 가뭄지수들은 PDSI(Palmer Drought Severity Index), CMI(Crop Moisture Index), SPI(Standardized Precipitation Index), SWSI(Surface Water Supply Index) 등이 있다. 이와 같은 가뭄지수들은 지수산정을 위해 이용하는 자료의 특성에 따라 동일한 공간 및 시간 단위에 대해 다양한 가뭄특성을 제시할 수 있다. 일반적으로 가뭄은 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄 및 사회·경제적 가뭄으로 정의될 수 있다. 기상학적 가뭄은 강수량의 부족으로 인해 발생하는 가뭄에 기반을 두고 있으며, 농업적 가뭄은 농작물, 산림, 초지 등의 생장에 필요한 토양수분량의 부족을 반영한다. 수문학적 가뭄은 강수량의 부족보다는 하천유량, 저수지 또는 호수의 수위 및 지하수와 같은 수자원 공급원의 부족과 연관되며, 사회·경제적 가뭄은 자연현상, 환경악화 및 사람들에게 대한 영향의 복잡한 상호작용으로 정의된다(Wilhite et al., 2000). 이와 같이 가뭄은 각 분야별로 다양한 시각으로 해석될 수 있으며, 기 개발된 가뭄지수를 이용하여 분야별로 가뭄상황을 모니터링 할 수 있다. 예를 들어 PDSI, SPI는 기상학적 가뭄의 평가에 주로 활용되고 있으며, CMI는 농업적 가뭄, SWSI는 수문학적 가뭄의 평가에 활용되고 있다.

그러나 일관된 가뭄의 정의 부재는 효과적인 가뭄관리 수행을 통한 통합가뭄관리의 실행에 있어 많은 어려움을 야기하고 있으며, 하나의 가뭄지수로는 다양한 가뭄특성을 포괄하여 제시하기 어려운 한계가 있다. 따라서 가뭄관리자는 해당 업무 특성에 적합한 가뭄지수의 활용과 개발을 필요로 한다.

우리나라에서 가뭄지수와 관련된 연구는 대부분 외국에서 개발된 가뭄지수의 적용성 판단에 집중되어 왔다(김선주 등, 1995; 윤용남 등, 1997; 이동률, 1998, 1999; 김상민, 박승우, 1999; 류재희 등, 2002; 신사철, 김철준, 2003). 또한 가뭄지수를 이용한 효율적인 가뭄

단계 설정과 가뭄의 조기경보를 위한 연구도 함께 수행되고 있다(조홍제, 1996; 임경진 등, 2001; 이동률 등, 2003; 이재웅, 유재복, 2003). 기존 개발된 가뭄지수들은 대부분 강수량, 하천유량, 용설량, 저수량 및 지하수위 등 공급 측면의 변수들을 이용하여 산정된다. 이들 지수들의 단점은 실제 물 이용자가 느끼는 물 부족을 반영할 수 없다는 점이다. 즉, 기상학적으로 심한 가뭄상황이라도 수요를 충족시킬 수 있는 수자원이 확보되어 있다면 실제 물 이용자는 물 부족을 체감하지 못하므로 가뭄의 심도를 느끼지 못한다. 따라서 이와 같은 상황에서는 지금까지 개발되어 제시된 가뭄지수로는 신뢰성 있는 가뭄정보를 제공하기 어려우며, 결국 물 관리자, 특히 저수지 관리자 입장에서는 공급과 수요를 동시에 고려한 가뭄지수의 개발을 필요로 할 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 필요성을 고려하여 수자원 시스템에서 중요한 용수공급시설인 저수지의 용수공급 능력과 수요량에 대한 검토를 통해 가뭄상황을 보다 적절히 나타낼 수 있는 유용한 지표를 개발하고자 하였다. 지표의 제시를 통해 현재의 가뭄상황에 대한 보다 직관적인 판단근거를 제시하고자 하였으며, 해당 저수지의 현재 상황을 명확히 파악함으로써 저수지의 효율적인 운영에 도움을 주고자 하였다. 본 연구를 통해 개발된 새로운 지표는 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)라 명명하였으며, 개발된 지수의 적정성을 검토하기 위해 표준물공급능력지수(Standardized Water Supply Capacity Index, SWSCI)를 산정하여 기존의 여러 가뭄지수들과 상관성 분석 등을 통하여 비교·평가하였다.

2. 배경이론

2.1 Palmer 가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)

Palmer(1965)는 정상적인 기후에서 현저하게 벗어난 비정상적인 습윤부족기간을 이상습윤부족이라 정의하였으며, 가뭄을 장기간의 이상습윤부족으로 인해 나타나는 현상으로 정의하였다. 정상적인 기후 조건하에서 특정 지역의 주어진 기간 동안 필요한 강수량을 산정하여 이를 실제 발생한 강수량과 비교함으로써 기후적으로 필요한 습윤 공급량의 크기를 산정하였으며, 이를 지수로 나타냄으로써 현재의 수분상황을 표현하였다. PDSI는 강수량, 기온 및 유효토양수분량에 의해 단순한 개념의 불수지방정식으로 산정되기 때문에 물리적 현상을 규명하는 이론적 배경이 미약한 한계(Alley, 1984)에도 불구하고 세계적으로 많이 이용되고 있는 가

품지수이다.

2.2 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)

McKee 등(1993)은 강수량의 부족이 하천유출량, 지하수량 등의 용수공급원에 영향을 미쳐 가뭄이 발생한다는 점에 착안하여 SPI를 개발하였다. SPI는 계산 시간단위를 3, 6, 9, 12 개월 등과 같이 설정하고 각 시간단위별로 강수 부족량을 산정하여 현재의 수분상황을 판단하게 된다. 또한 각 시간단위에서 산정된 지수 값은 각각 단기간, 장기간의 수분상황을 반영하는 지표로 이용될 수 있으므로 SPI는 여러 가지 목적으로 이용될 수 있다. 즉, 단기간의 SPI는 농업적 가뭄을 평가하는데 이용될 수 있으며, 비교적 장기간의 시간단위에서 산정된 지수 값은 수자원 공급 및 관리 등의 목적을 위해 이용될 수 있다.

SPI는 선형적으로 강수부족에 비례하며, 지수를 산정하는 과정에서 확률, 누가강수평균 백분율(accumulative precipitation percent of average), 누가강수부족량을 고려하게 된다. 이와 같이 산정된 표준강수지수는 지수 값의 결정과정에 확률분포형을 도입하였기 때문에 현재의 가뭄상황뿐만 아니라 가뭄이 끝나기 위해 필요한 강수량을 확률적으로 결정할 수 있다.

2.3 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI)

SWSI는 광범위한 토양수분조건이 지형적으로 변화가 심한 산악지역의 응설에 적용하는데 따르는 PDSI의 한계를 보완하는 과정에서 제안된 지수로서 Shafer and Dezman(1982)에 의해 개발되어 미국 콜로라도 유역에 최초로 적용되었다.

SWSI는 가뭄에 영향을 미치는 인자로 표면유출인자(강수, 적설, 하천유출, 저수지 저수량)를 고려하였으며, 각 인자를 통계학적으로 해석하고 각각의 기여도를 결정하여 가중치로 이용함으로써 유역의 수분상황을 대표하는 하나의 지수를 얻는 절차를 거친다. 이 지수의 기본적인 개념은 각 수문인자들의 비초과확률변수를 사용하는 것으로 다른 지역에서도 용수공급 능력의 비교가 가능토록 하는 것이다.

이와 같은 특성을 갖는 SWSI는 PDSI에 비해 많은 수문인자를 고려하기 때문에 수문학적 가뭄에 대한 지표를 제공할 수 있다. 또한 PDSI에서와 같이 가뭄의 종료 및 시작에 대한 확률을 고려하지 않아도 되는 장점이 있으나, 각 수문인자의 자료계열이 간섭 등의 영향을 받게 되면 안정된 시계열을 획득하기 어렵게 되므로

정확한 통계적 특성 획득에 문제가 생기게 된다.

본 연구에서 SWSI는 다목적댐의 저수량과 강수량 인자만을 이용하여 산정하였다. 우리나라에서 하천유출량은 강수량과 직접적인 비례상관 관계가 있고, 유출량 자료의 신뢰성이 좋지 못하여 하천유출량의 이용은 SWSI값을 왜곡시킬 수 있다.

2.4 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)

본 연구에서 개발된 WSCI는 현재의 저수지 저수량과 향후 공급해야하는 수요량과의 물수지 평가를 수행함으로써 저수지에서 향후로 공급 가능한 시간을 정량화한 지수이다. 즉, 기존 다목적댐 별로 설정되어 있는 용수공급량은 각 댐의 저수지에 요구되는 수요량으로 고려할 수 있으며, 현재 다목적댐 저수지의 저수량과 월별로 계획된 용수공급량을 감안하여 앞으로 용수공급이 가능한 개월 수를 산정한 결과가 WSCI로서 개월의 단위를 갖는다. 해당 월의 저수량을 익월의 용수공급량으로 감한 후 남은 저수량과 그 다음 월의 용수공급량을 비교하게 되며, 남아있는 저수량이 계획된 용수공급량보다 많을 경우 동일한 절차를 반복하여 앞으로 몇 개월 후의 용수공급량까지 충족할 수 있는가를 계산함으로써 지수가 산정된다. WSCI 산정과정에서는 해당 댐 저수지의 저수량에 대한 추가적인 유입량은 고려하지 않으므로, WSCI는 향후 강수량이 없고 저수지로의 유입량이 없는 최악의 기상상황에서 향후 몇 개월의 공급내한능력이 있는 가를 판단한 수치라고 볼 수 있다. 그러나 익월에 발생 가능한 저수지 예측유입량을 이용하게 되면 WSCI를 저수지 운영을 위한 예측지표로 활용할 수 있다.

WSCI를 산정할 때 적용되는 저수량은 유효저수량이다. 당월 말 저수량을 S_t 라 하고 익월의 용수공급량을 D_{t+1} , 그 다음 월의 용수공급량을 순차적으로 $D_{t+2}, D_{t+3}, \dots, D_n$ 이라고 할 때, 해당 댐에 대한 WSCI의 산정절차는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 계산 순서도는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

- ① WSCI의 초기치 $WSCI_0 = 0$ 으로 한다.
- ② $S_t \geq D_{t+1}$ 인가를 판단한다.
- ③ ②가 참이면 $WSCI_1 = 1$, $S_{t,1} = S_t - D_{t+1}$ 이 되고 ②가 거짓이면 최종적인 WSCI를 결정하여야 하며, $WSCI_{최종} = WSCI_0 + (S_t/D_{t+1})$ 로 최종 WSCI가 결정된다.
- ④ ②가 참일 경우, ③이 계산된 후 $S_{t,1} \geq D_{t+2}$ 인

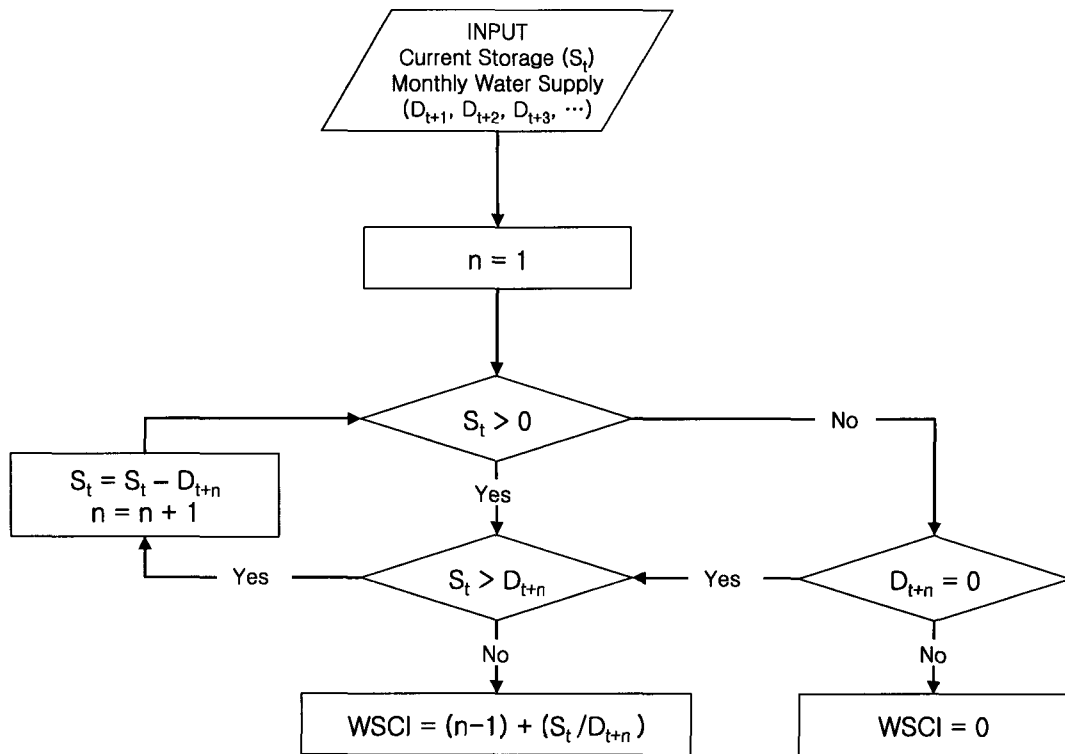


Fig. 1. A flow chart for the determination of WSCI

가를 판단하고 ③의 과정을 반복하여 $S_{t,1} \geq D_n$ 이 거짓이 될 때까지 반복한다.

- ⑤ $WSCI_{\text{최종}} = (n-1) + (S_{t,n-1}/D_n)$ 의 관계를 이용하여 최종적인 WSCI를 결정한다.

WSCI 산정을 위한 최종 관계식에서 $(n-1)$ 은 저수지의 현재 저수량으로 공급할 수 있는 개월 수를 의미하며, $(S_{t,n-1}/D_n)$ 는 $(n-1)$ 개월 동안 용수를 공급한 후 남은 저수량이 현재부터 n 개월 후의 공급계획량보다 작기 때문에 마지막 n 개월 후의 해당 월에 대한 용수공급계획량 중 어느 정도를 감당할 수 있는 가를 의미하는 값이 된다. 따라서 이 두 가지 값을 합하게 되면 현재의 댐 저수량으로 공급할 수 있는 능력을 나타내는 지표를 얻을 수 있다.

이와 같은 절차를 거쳐 산정되는 WSCI는 각 댐별로 설정되어 있는 저수량 및 용수공급량(수요량)을 반영한 지수이므로 댐별로 산정되는 값은 해당 댐의 특성을 나타내는 고유 값이라고 볼 수 있다. WSCI만으로도 해당 댐의 현재 용수공급능력을 평가할 수 있는 지표로 활용될 수 있으나, 기존 가뭄지수들을 이용하여 적용되는 일반적인 가뭄분류 기준의 적용과 가뭄 정도의 비교가 가능토록 유사한 범위를 갖는 일반화된 지표로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 SPI 산정 시 이용되는 절차인 표준화 과정을

WSCI에 적용하여 보다 객관적인 가뭄분류 지표를 제시하고자 하였으며, 표준화 과정을 거쳐 산정된 새로운 지수를 표준물공급능력지수(Standardized Water Supply Capacity Index, SWSCI)라 명명하였다. SPI 산정 시 이용되는 표준화 과정을 적용한 이유는 SPI와 동일한 방법으로 표준화된 지수 값을 산정하게 되므로 표준화된 지수가 나타내는 가뭄심도가 유사한 범위를 갖게 되어 비교가 용이하기 때문이다. SWSCI는 SPI에서와 마찬가지로 Fig. 2와 같이 월별 WSCI의 각 변량에 대한 누가확률 값을 결정한 후 개개 변량에 대해 산정된 누가확률분포를 이론적인 누가확률분포와 비교하여 적합한 이론확률분포를 산정한 후 표준정규 분포에 적용시키는 과정을 통해 산정된다. 이 때 월별 WSCI의 각 변량에 대한 누가확률 값은 다음 Eq. (1)과 같이 나타내어지는 Weibull 공식을 이용하여 산정하였으며, 작성된 WSCI의 누가확률분포에 대한 적합도 검정은 K-S 검정법을 이용하였다.

$$P(X \leq x) = F(x) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad (1)$$

여기서 n 은 자료치 계열을 구성하고 있는 자료의 총수, m 은 전 자료를 내림차순으로 나열했을 때의 순위이다.

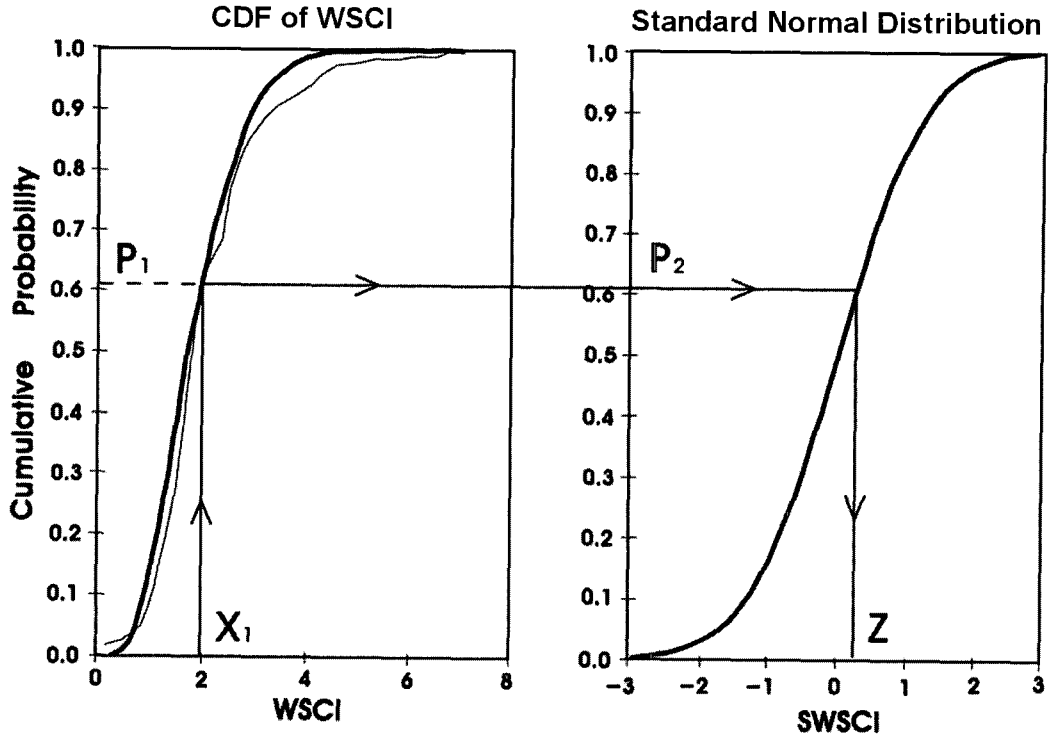


Fig. 2. Standardization of WSCI

Table 1은 본 연구의 대상 다목적댐 중 자료기간이 가장 긴 소양강댐에 대한 적합도 검정 결과를 나타내고 있다. K-S 검정법을 이용하여 적합도 검정을 실시한 결과 2변수 대수정규분포를 제외한 모든 확률분포에 대해 적합한 것으로 나타나고 있으며, 이러한 결과는 나머지 다른 댐에서도 유사하게 나타났다. 본 연구에서는 WSCI의 표준화를 통한 SWSCI 산정을 위한 확률분포로 SPI에서 이용하고 있는 2변수 Gamma 분포를 이용하였다. 2변수 Gamma 분포는 Eq. (2)와 같은 확률밀도함수로 나타내어지며, Fig. 3은 소양강댐

의 6월과 10월 WSCI에 대해 실제 자료의 누가분포와 2변수 Gamma 분포의 누가분포를 함께 도시하여 비교한 결과이다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}} \quad (2)$$

여기서 2개의 변수 α 와 β 는 각각 분포의 축척 및 모양을 결정하는 매개변수이며, $\Gamma(\beta)$ 는 완전 Gamma 함수를 의미한다.

Table 1. The results of goodness of fit test for monthly WSCI in Soyanggang dam (confidence limit 95%)

Distributions	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Normal	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2-para. Log-normal	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3-para. Log-normal	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2-para. Gamma	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pearson Type-III	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Log-Pearson Type-III	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gumbel	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Generalized Extreme	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Wakeby	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

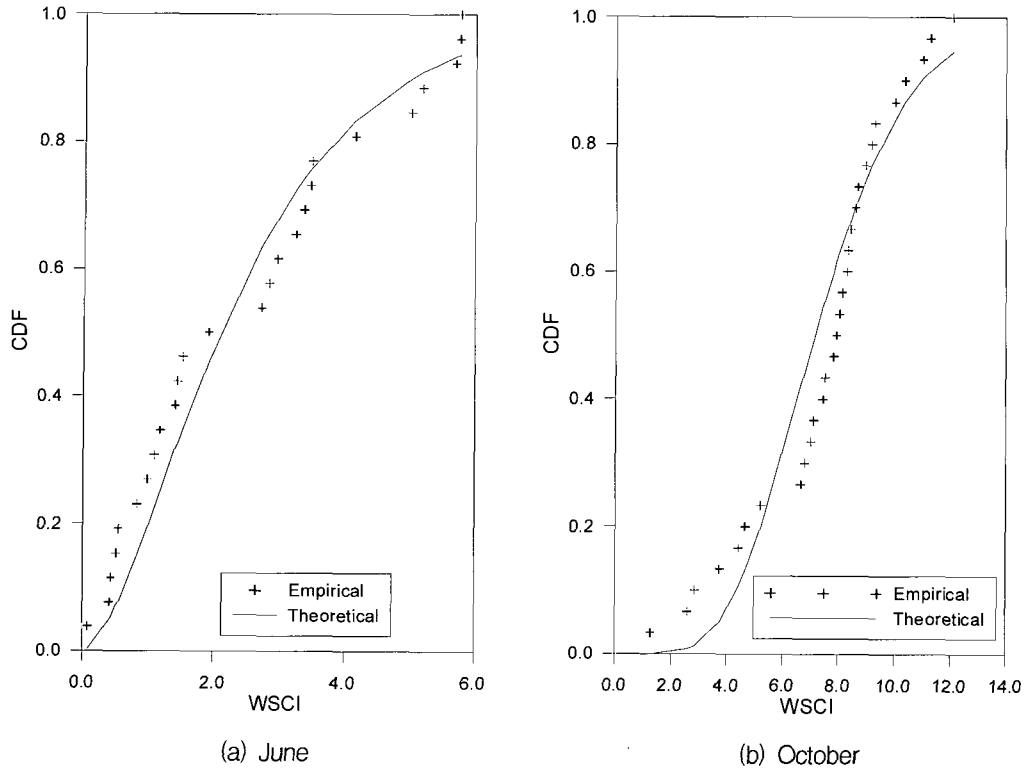


Fig. 3. The comparison between empirical and theoretical CDF in Soyanggang dam

3. 대상지점 및 자료

본 연구에서는 국내의 여러 다목적댐 중 최근에 완공된 댐과 낙동강 수계에 위치한 남강댐을 제외한 총 10개 다목적댐에 대하여 WSCI를 산정하였다. 최근에 완공된 다목적댐의 경우에는 단기간의 저수량 자료를 가지고 있기 때문에 연구대상에서 제외되었으며, 남강댐은 1969년 준공이후 2차에 걸친 보강공사로 인해 총 저수량과 월별 공급계획량 자료에 일관성이 없는 것으로 판단되어 연구대상에서 제외하였다. Table 2는 본 연구에서 WSCI를 산정하기 위해 채택된 10개 다목적댐의 저수량과 저수량 자료기간을 정리한 것으로 총

저수량과 유효저수량 자료는 다목적댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2000)에서 제시된 내용을 이용하였다.

4. 적용결과

4.1 WSCI의 산정

연구대상으로 선정된 10개 다목적댐의 월별 저수량과 계획공급량을 이용하여 본 연구에서 개발된 WSCI를 산정하였으며, 각 댐에서 산정된 월별 WSCI를 검토함으로써 해당 댐의 용수공급능력을 파악하였다. 이를 위해 먼저 각 댐에서 산정된 월별 WSCI를 댐별로 비교

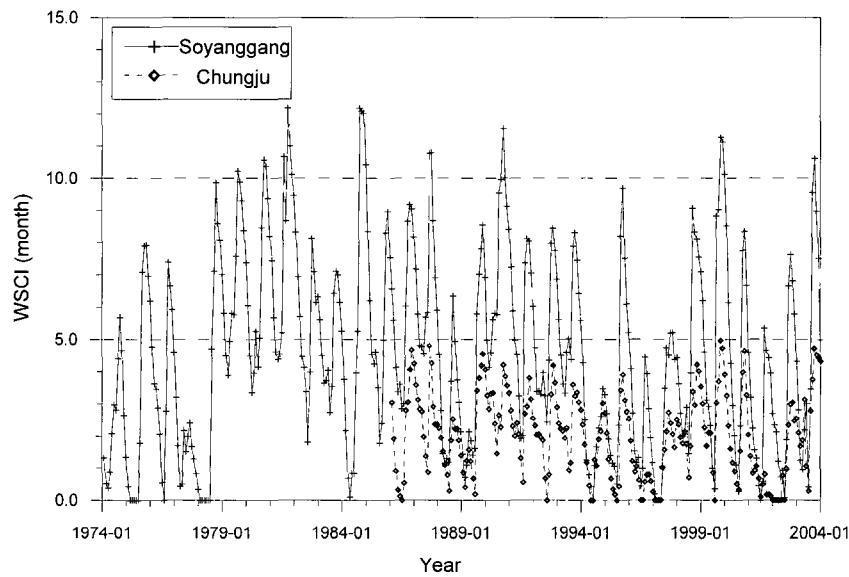
Table 2. Storage and data duration of multi-purpose dams

Watershed	Dam	Total storage (10 ⁶ m ³)	Effective storage (10 ⁶ m ³)	Observation period
Han river	Soyanggang	2,900	1,900	1974. 1. ~
	Chungju	2,750	1,789	1985. 6. ~
Nakdong river	Andong	1,248	1,000	1977. 1. ~
	Imha	595	424	1992. 1. ~
	Hapcheon	790	560	1989. 1. ~
Geum river	Daechung	1,490	790	1981. 1. ~
Sumjin river	Sumjingang	466	370	1975. 1. ~
	Juam	457	352	1991. 1. ~
	Juam jojeol	250	210	1991. 1. ~
	Buan	41.5	35.6	1997. 1. ~

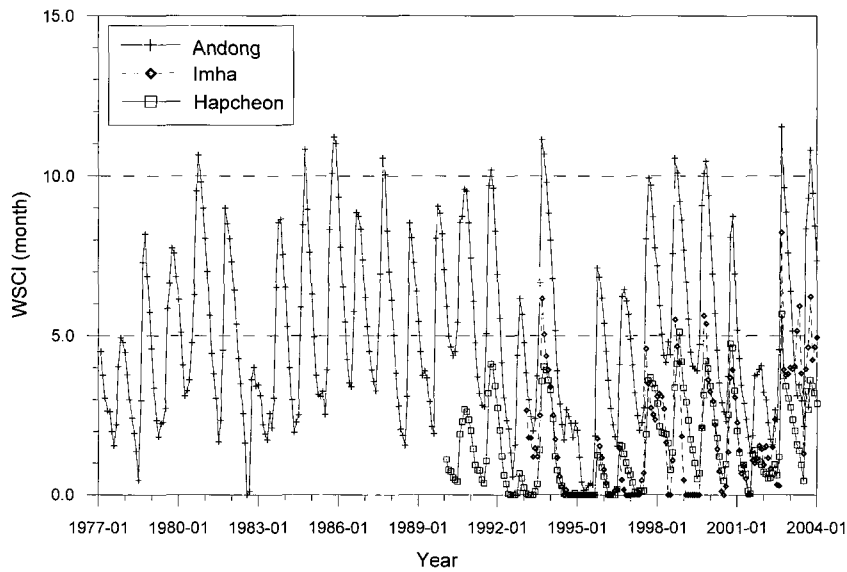
하여 해당 댐의 특성을 검토하였으며, 월별로 각 댐의 결과를 비교하여 각각의 용수공급능력을 평가하였다. Fig. 4는 각 댐별로 산정된 WSCI의 시계열을 각 권역별로 구분하여 도시한 내용이며, Fig. 5는 각 댐에 대해 산정된 WSCI의 월별 평균, 최대 및 최소를 도시한 것으로 이를 통해 시간에 따른 지수의 변화양상 및 분포 범위 등을 파악할 수 있다.

Fig. 4를 이용하여 각 다목적댐에서 산정된 WSCI의 범위를 개략적으로 살펴보면, 소양강댐, 안동댐 및 섬진강권역의 댐들은 0~15개월, 충주댐, 임하댐, 합천댐 및 대청댐은 0~6개월의 범위에 지수가 분포하고 있음을

알 수 있다. 또한 극심한 가뭄이 발생했던 1994~1995년의 기간에는 주암댐과 부안댐(부안댐은 건설이전임)을 제외한 나머지 모든 다목적댐에서 WSCI가 1개월 이하로 나타나고 있으며, 심하게는 0까지 떨어져 댐의 용수공급능력이 완전히 고갈된 상황에 직면했음을 알 수 있다. WSCI의 값이 1개월 이하로 나타나는 상황 역시 당장의 용수공급이 불가능한 상태를 의미하는 것이므로 대부분의 댐에서 매우 심각한 상황이 발생하였음을 알 수 있으며, 1994~1995년 가뭄상황 외에도 각 댐별로 이러한 상황이 여러 차례 반복되고 있음을 확인할 수 있다.

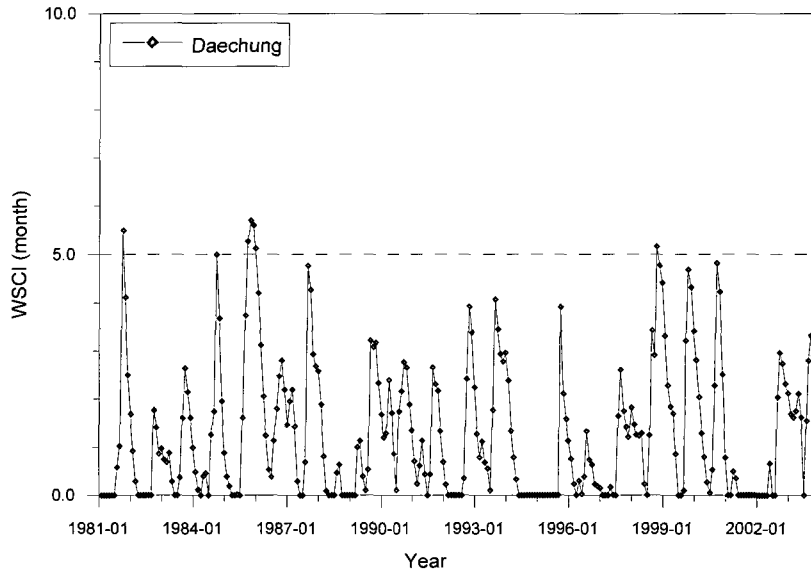


(a) Han river

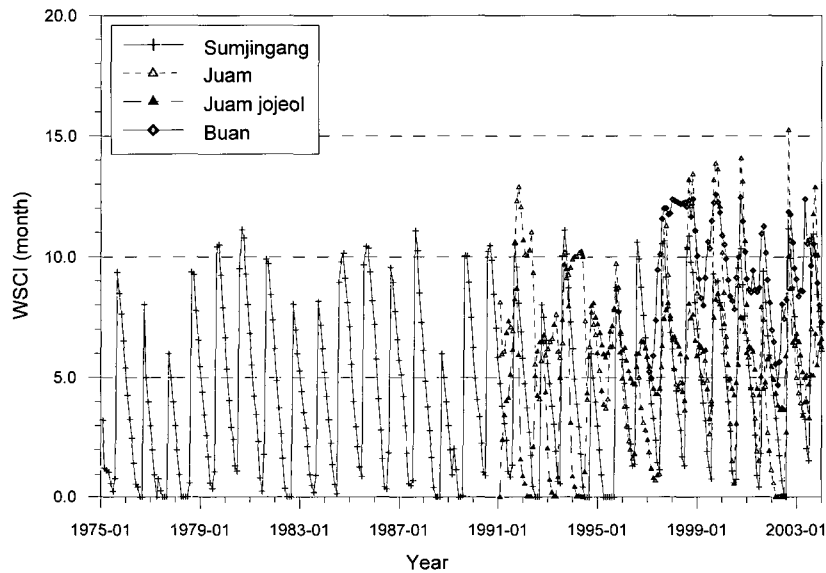


(b) Nakdong river

Fig. 4. Estimated WSCI in each multi-purpose dam (continued)



(c) Geum river



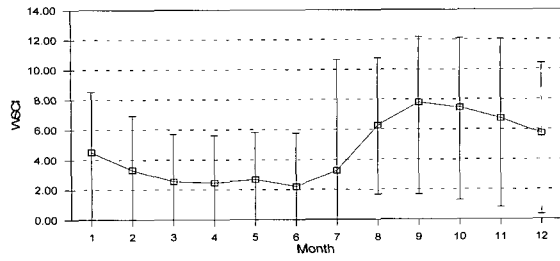
(d) Youngsan · Sumjin river

Fig. 4. Estimated WSCI in each multi-purpose dam

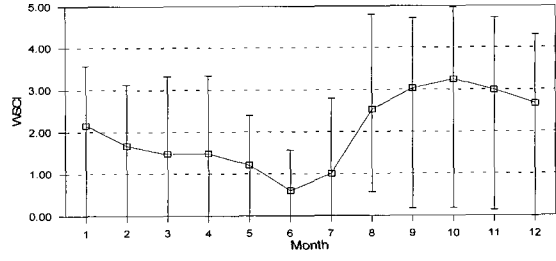
Fig. 5를 통해 각 댐의 월별 WSCI에 대한 최대, 최소 및 평균값의 변동양상을 살펴보면, 부안댐을 제외한 나머지 9개 댐의 경우 1월부터 6월까지 지속적으로 감소하다가 7월부터 9월까지의 홍수기를 거치면서 상승한 후 다시 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 우기를 제외한 나머지 기간 동안 겨울철 강수량의 부족 및 봄철 용수수요의 증가로 인해 나타나는 결과라고 판단할 수 있다. 이로부터 1년 중 댐의 용수공급능력이 가장 낮게 떨어지는 시기는 4~6월이라고 볼 수 있으며, 7~9월의 회복기간을 거쳐 나타나는 9월의 상황이 각 댐의 용수공급능력이 최대가 되는 시기로 판단할 수 있다. 따라

서 4, 5, 6월 및 9월의 WSCI 분포양상을 비교함으로써 각 댐의 용수공급능력의 정도를 평가할 수 있다. Fig. 6은 4, 5, 6월 및 9월의 WSCI의 분포양상을 10개 댐에 대해 도시하여 비교한 것이다.

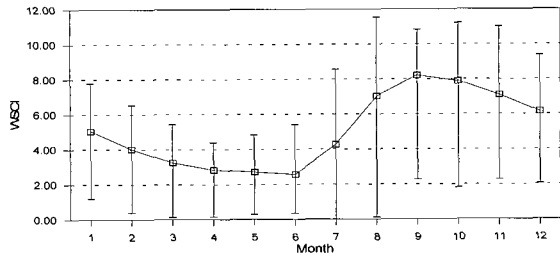
Fig. 6을 통해서 10개 댐에 대한 용수공급능력을 평가해볼 수 있다. 먼저 1년 중 가장 용수공급능력이 떨어지는 시기인 4~6월의 결과를 살펴보면 충주, 임하, 합천, 대청, 섬진강댐은 평균적으로 2개월보다 낮은 지수를 나타내고 있으며, 소양강, 안동, 주암조절지댐은 2~4개월, 그리고 주암댐과 부안댐은 4개월 이상의 값을 나타내고 있다. 부안댐의 경우 Fig. 4의 연간 변동양



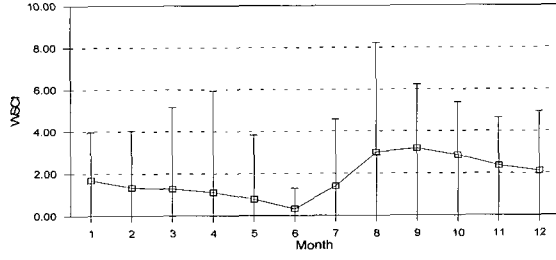
(a) Soyanggang



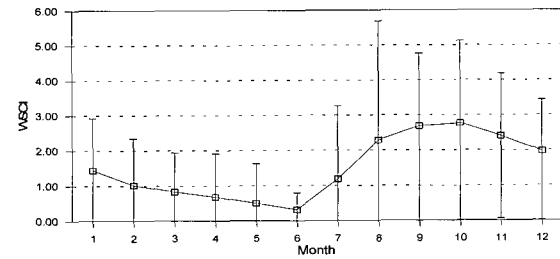
(b) Chungju



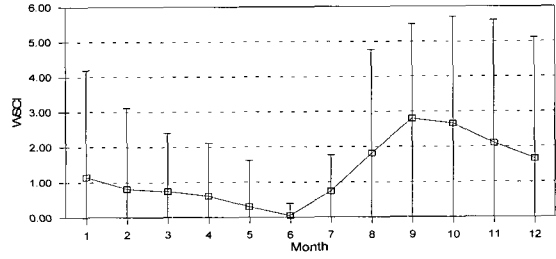
(c) Andong



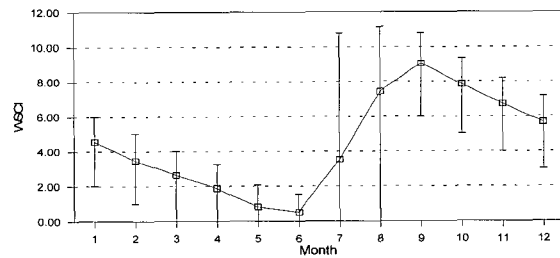
(d) Imha



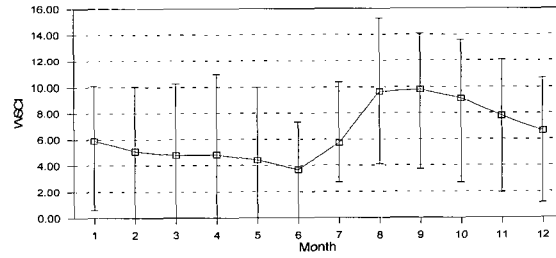
(e) Hapcheon



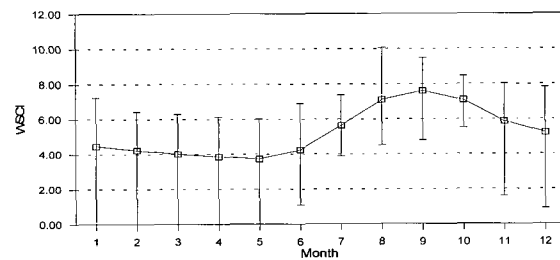
(f) Daechung



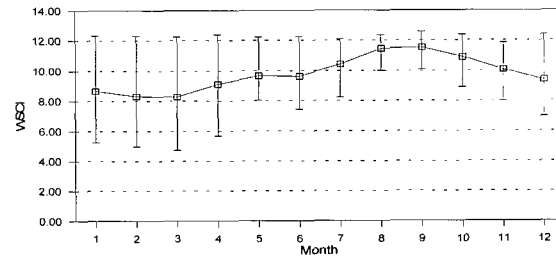
(g) Sumjiingang



(h) Juam



(i) Juam joeol



(j) Buan

Fig. 5. Monthly range and variation of WSCI in each multi-purpose dam

상에서 나타나고 있듯이 다른 댐들에 비해 안정적인 변동양상을 보여주고 있으며, 용수공급능력이 가장 떨어지는 시기에도 8개월 이상의 값을 나타내고 있어 용수

공급능력이 매우 안정적인 댐이라고 판단할 수 있다. 주암댐 역시 최소 4개월 이상의 WSCI를 나타내고 있으므로 안정적인 용수확보가 가능한 댐임을 알 수 있다.

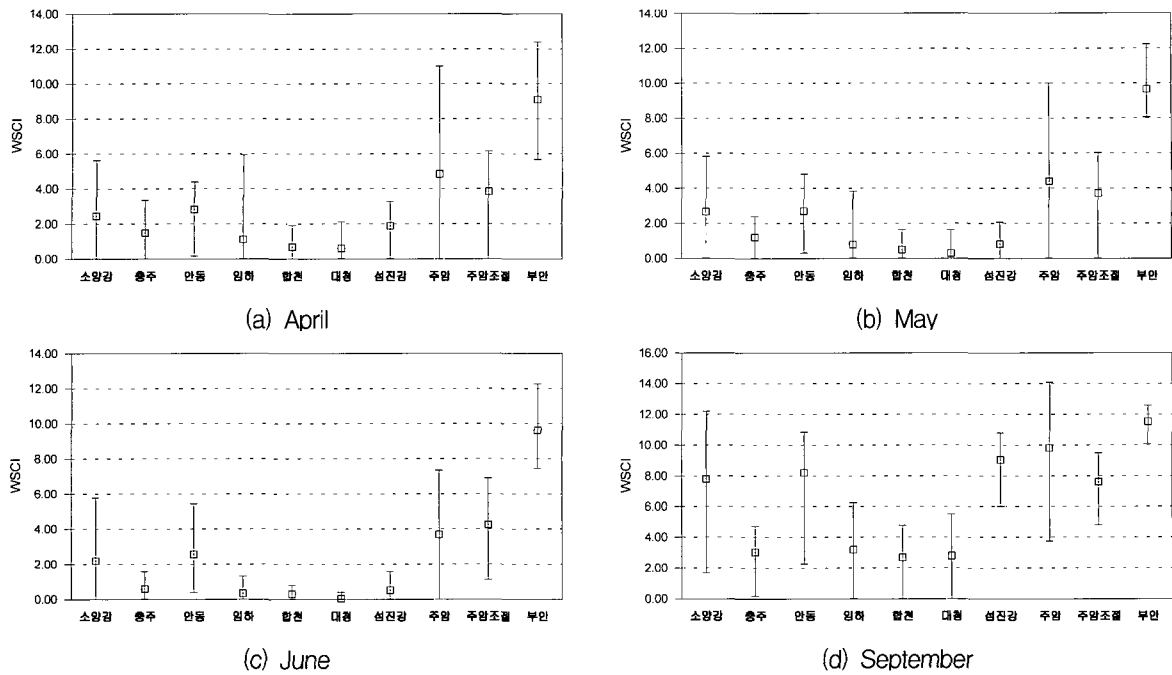


Fig. 6. The comparison of WSCI range in each multi-purpose dam (April, May, June, September)

또한 소양강, 안동, 주암조절지댐의 경우에도 최소 2개월 이상의 용수공급이 가능한 것으로 나타나고 있어 비교적 안정적인 용수공급능력을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 충주, 임하, 합천, 대청, 섬진강댐은 6월의 결과에서 최소 1개월의 공급능력도 확보하기 어려운 것으로 나타나고 있어 용수공급능력이 매우 부족한 댐이라고 분류할 수 있다. 이들 댐의 경우에는 홍수기를 통해 공급능력이 최대로 회복된 시기라고 볼 수 있는 9월의 결과에서도 섬진강댐을 제외하고는 약 3개월 가량의 비교적 낮은 공급능력을 나타내고 있어 기본적으로 댐 규모에 비해 공급해야 할 양이 크게 설정되어 있어 작은 가뭄상황에도 물 공급에 상당한 어려움이 발생할 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 섬진강댐은 홍수기를 통해 약 9개월 정도까지 용수공급능력이 회복되고 있으나, 이는 섬진강댐에 대해 월별로 계획된 용수공급량의 특성에 따른 결과로 보인다. 즉, 섬진강댐은 10월부터 이듬해 3월까지 월별로 계획된 공급량이 없으며, 이로 인해 해당 기간 동안에는 저수량이 없어 산정되는 WSCI는 최소 6개월 이상으로 나타날 수 있기 때문이다. 이러한 영향으로 섬진강댐은 산정되는 WSCI의 범위가 다른 댐들에 비해 상대적으로 매우 크게 나타나고 있다. 결과적으로 본 연구에서 WSCI를 산정하여 용수공급능력을 검토한 10개 다목적댐은 일부 몇 개 댐을 제외하고는 월별로 계획된 수요량에 대한 공급능력이 전반적으로 안정적이지 못한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 WSCI를 산정하여 검토함으로써

다목적댐의 용수공급능력에 대한 평가를 수행할 수 있으며, 수자원 부족량의 불균형 파악 및 수자원 개발지점의 우선순위 결정 등과 같은 의사결정을 위해 WSCI가 하나의 기준으로 고려될 수 있을 것이다. 또한, 수요량을 공급할 수 있는 기간(1개월, 2개월, 3개월 등)에 대해 가뭄단계를 설정하여 적용한다면 가뭄기간 동안 저수지를 운영함에 있어 해당 구역의 수문상황과 물 공급원의 상황을 모니터링 함으로써 조절방류 등과 같은 의사결정을 위해 WSCI가 유용하게 이용될 수 있다.

4.2 SWSCI의 산정

제시된 WSCI를 기존 가뭄지수들의 가뭄심도 분류기준과 비교 평가하기 위하여 WSCI를 표준화한 SWSCI를 산정하였다. SWSCI는 SPI에서 적용되는 표준화 과정을 동일하게 적용하여 산정된 지수이므로 다른 가뭄지수들과의 비교가 용이할 뿐만 아니라 SWSCI를 이용하여 용수확보량이 다른 여러 저수지의 월별 가뭄 심각도를 동일한 기준으로 평가할 수 있다. Fig. 7은 10개 다목적댐에 대해 산정된 SWSCI의 시계열을 나타내고 있다.

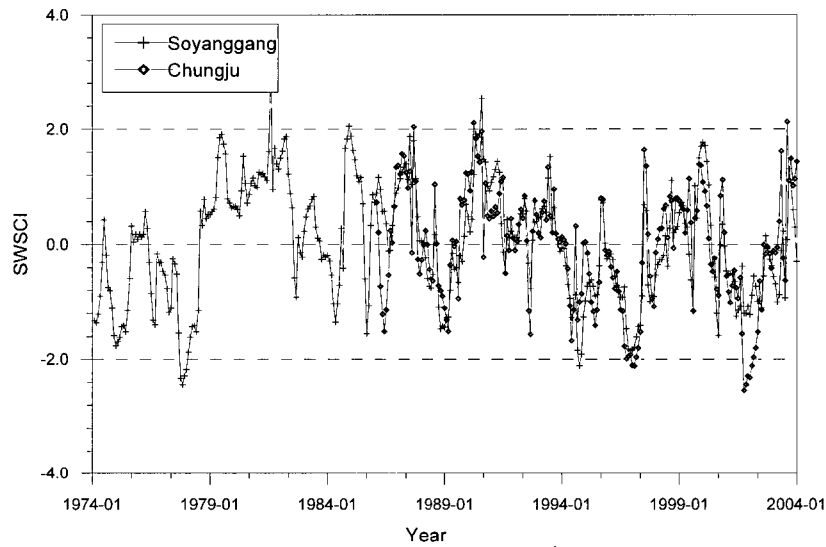
먼저 한강권역의 경우 2001년에 발생한 중부지방 가뭄상황의 심각도를 SWSCI가 잘 나타내주고 있음을 알 수 있으며, 과거 가뭄이 발생했던 시기에 대해서도 산정된 SWSCI가 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 같은 한강권역에 속해있는 소양강댐과 충주댐에 대한 비교를 통해 당시 두 댐의 가뭄 심각도에 대한 비교

가 가능하다. 앞서 WSCI를 이용한 분석에서 소양강댐보다 충주댐의 용수공급능력이 취약한 것으로 나타났던 결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 즉, 2001년 가뭄의 경우 소양강댐에 비해 충주댐에서 상대적으로 심각한 가뭄상황이 나타나고 있음을 알 수 있으며, 충주댐에서는 -2.0 이하의 지수 값을 나타내어 매우 심각한 상황에 이르렀음을 파악할 수 있다.

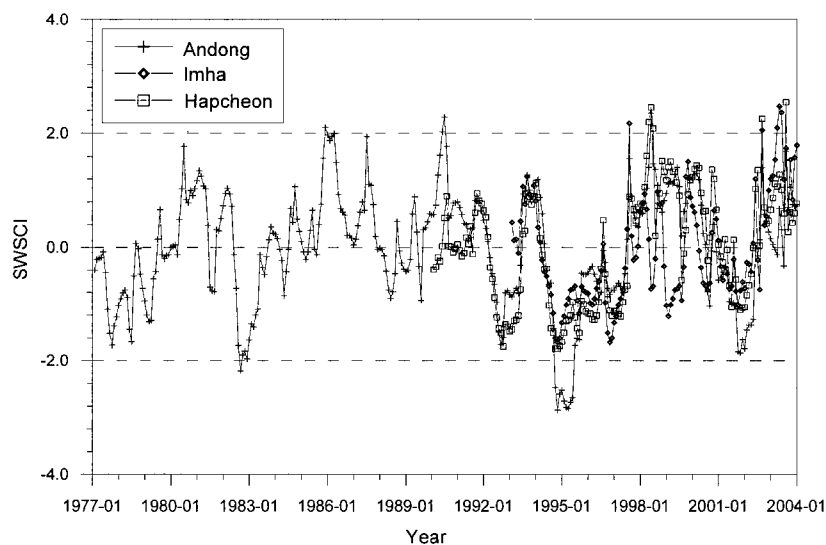
낙동강권역에서는 1994-1995년 가뭄 시 임하댐과 합천댐에 비해 안동댐에서 상대적으로 심각한 가뭄상황이 발생했음을 알 수 있다. WSCI를 이용한 분석에서는 안동댐의 용수공급능력이 임하댐과 합천댐에 비해 양호한 것으로 분석되었으나, SWSCI를 이용하여 산정한 결과에서는 가뭄상황 시 심각도가 반대로 나타나고 있다.

이러한 결과는 해당 가뭄상황에서 안동댐에 확보된 저수량이 평균적인 수준에 크게 못 미쳤음을 의미하는 것으로 파악할 수 있으며, 임하댐과 합천댐의 상황이 안동댐보다 양호한 수준임을 의미하는 것은 아니다. 따라서 SWSCI만 고려하여 저수지에 대한 가뭄감시를 수행하는 것 보다는 WSCI와 SWSCI를 함께 고려하여 가뭄에 대한 모니터링을 수행하는 것이 저수지 운영에 대해 보다 정확한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

다른 권역의 결과에서도 과거 발생한 가뭄상황을 SWSCI가 효과적으로 재현하고 있음을 알 수 있으며, WSCI와 SWSCI를 동시에 고려함으로써 동일 권역 내에 위치한 여러 댐에서의 상황에 대한 비교 및 보다 명확한 상황파악이 가능함을 알 수 있다.

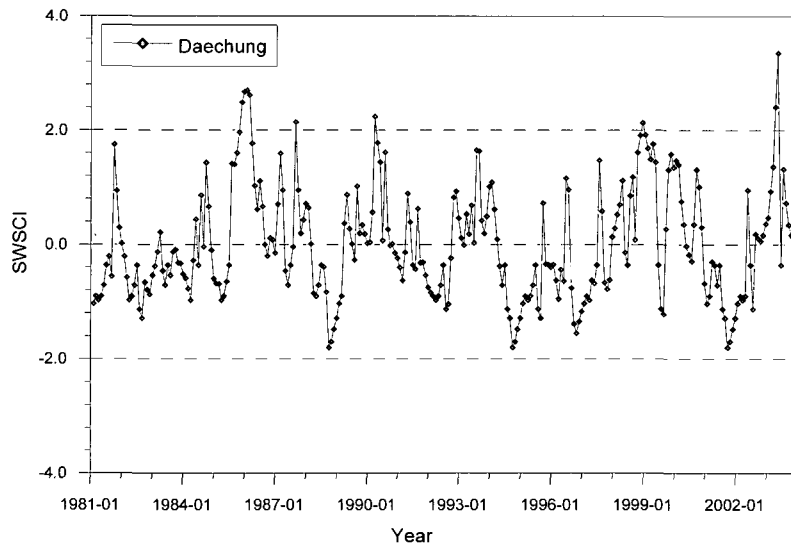


(a) Han river

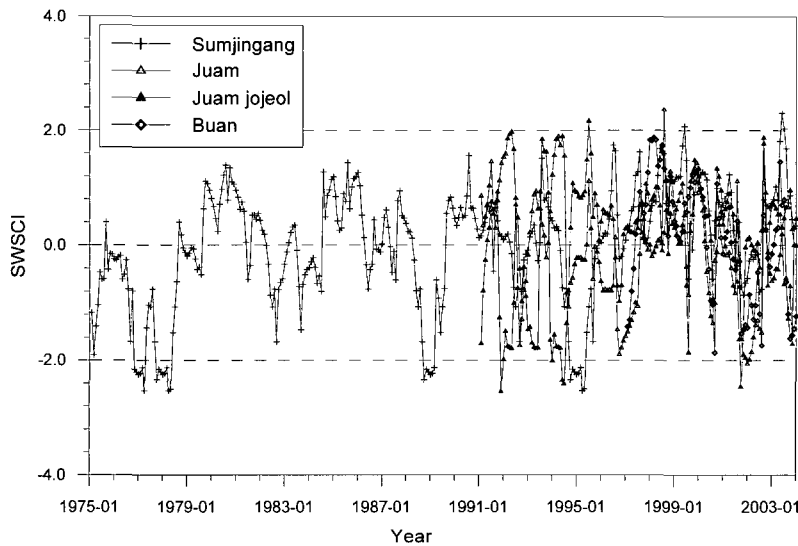


(b) Nakdong river

Fig. 7. The time series of SWSCI in each multi-purpose dam (continued)



(c) Geum river



(d) Youngsan · Sumiin river

Fig. 7. The time series of SWSCI in each multi-purpose dam

5. 기존 가뭄지수들과 SWSCI의 상관성 분석

각 권역별로 저수용량이 가장 큰 다목적댐에 대해 산정된 SWSCI와 기존 가뭄지수(PDSI, SPI, SWSI)의 해당 권역 평균값에 대해 상관성 분석을 수행하였다. 이 때 본 연구에서 이용한 SWSI는 저수지 저수량과 강수량의 두 가지 인자를 이용하여 산정된 결과이다. Table 3은 상관분석 결과를 정리하여 나타낸 것이며, Fig. 8은 소양강댐의 SWSCI와 한강권역의 PDSI 및 SWSI를 함께 도시하여 나타낸 것이다.

상관분석 결과 SWSCI와 PDSI의 상관도가 평균 0.6 정도의 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있었으며, SPI는 지속기간이 짧은 경우보다는 지속기간이 6~12

개월 정도인 장기간 지속기간에서 상대적으로 높은 상관관계가 나타났다. SWSI의 경우 소양강댐에서는 SWSCI와 가장 높은 상관관계를 나타내고 있으나, 다른 댐들에서는 거의 무상관에 가까운 결과를 보이고 있는 등 큰 편차를 나타내고 있다. 이와 같이 기존 가뭄지수들과의 상관도가 비교적 작게 나타나는 이유는 기존 가뭄지수들의 경우 강수량 등의 기상학적 요소에 큰 영향을 받는 반면, 저수량과 수요량을 고려하여 산정되는 SWSCI는 저수량과 수요량의 특성 상 해당 인자의 변화가 기상상태에 따라 즉각적인 반응을 일으키지 않기 때문이다. 대규모 저수지의 경우는 기상상태에 따라 인위적인 저수량 조절이 수행되므로 기상상황과 전혀 무관할 수는 없지만 그 영향은 크지 않을 수 있다.

Table 3. Correlation coefficients between SWSCI and other drought indices

Dam	Correlation coefficient						
	PDSI	SWSI	SPI1	SPI3	SPI6	SPI9	SPI12
Soyanggang	0.5729	0.6953	0.1105	0.3601	0.5223	0.5705	0.5084
Andong	0.6685	-0.0676	0.1181	0.3480	0.5939	0.7270	0.7269
Daechung	0.6567	0.0486	0.1924	0.4715	0.6126	0.5982	0.5673
Sumjingang	0.6163	0.3124	0.1721	0.4060	0.5946	0.6840	0.6383

NOTE 1) SWSI : using storage and precipitation

SPI1, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 : the SPI for 1, 3, 6, 9, 12 month time scales

2) Mean drought index values in watershed including the multi-purpose dam

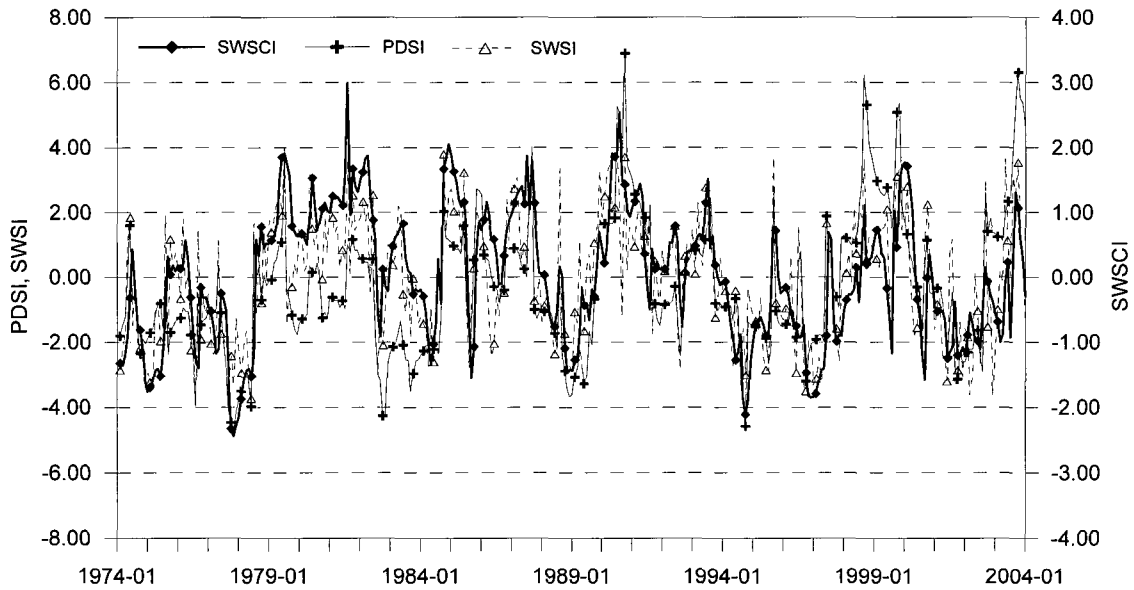


Fig. 8. The comparison between SWSCI and other drought indices in Soyanggang dam

SWSCI와 가뭄지수간의 상관도가 낮게 나타나는 점이 SWSCI가 가뭄심도를 표현하기에 부적절함을 의미하는 것은 아니다. 최근 가뭄심도를 표현함에 있어 물 관리자 또는 물 이용자들이 현장에서 체감할 수 있는 지표의 개발이 요구되고 있다. 따라서 사회 경제적인 측면에서 가뭄을 평가하면, 물의 수요와 공급의 관계에서 공급부족으로 인하여 수요가 공급을 초과할 때 가뭄이 발생한다고 볼 수 있기 때문에 실제 물을 공급할 수 있는 능력에 주목하여야 할 것이다. 즉, 물공급시설의 수혜를 받고 있는 비율이 높은 지역은 기상학적, 수문학적 가뭄인자 뿐만 아니라 물공급시설의 상황을 고려한 가뭄단계의 설정이 필요하다. 미국의 대부분의 주에서는 가뭄의 심도를 파악함에 있어 여러 가지 가뭄지표를 동시에 고려하고 있다. 특히 펜실베이니아 주는 4가지 가뭄지표를 복합적으로 고려한 다중가뭄지수를 산정하고 이에 의해 가뭄단계를 설정하고 있으며, 뉴욕 주도 5가지 가뭄지수를 이용하여 다중가뭄지수를 산정할

뿐만 아니라 지역별로 각 가뭄지수의 비중을 따라 가중치를 달리하여 적용하고 있다.

결국 SWSCI와 가뭄지수들 간에 상관도가 높지 않다는 점은 어떤 지역에서의 전반적인 가뭄상황을 나타내는 기존 가뭄지수들이 해당 지역에 위치한 물공급시설의 상황을 적절히 반영하지 않고 있음을 나타내는 것이다. 그러므로 본 연구에서 개발한 WSCI 및 SWSCI와 같이 물공급시설의 현황을 반영하는 지수가 가뭄상황 파악의 보완적인 요소로써 기존 가뭄지수와 함께 고려되어야 함을 반증하는 결과라 할 수 있다. 특히, 다목적댐의 하류부에 위치한 지역들의 체감가뭄은 WSCI 및 SWSCI에 의해 보다 효과적으로 표현될 수 있다.

6. 과거 가뭄기간에 대한 물공급능력지수 평가

소양강댐에 대한 Fig. 8의 각 지수 간 비교에서 장기간의 가뭄 시에는 SWSCI가 -1.50이하까지 떨어지는

극심한 상태가 나타나고 있다. 특히, 1994~1995년의 가뭄 시에는 전 권역에서 기존 가뭄지수와 함께 SWSCI도 유사한 극한 가뭄상황을 나타내고 있다. 이러한 결과는 2년에 걸친 장기간의 가뭄에는 인위적인 저수량 조절조차 불가능하여 기상학적 상태가 그대로 저수상황에 반영되기 때문이다. 즉, 장기간의 극심한 가뭄기간에는 SWSCI와 각 가뭄지수간의 상관성이 상대적으로 높게 나타나게 된다.

SWSCI가 가뭄지수로서의 역할을 수행하기 위해서는 적절한 가뭄분류 기준이 제시될 필요가 있으며, 과거 가뭄기간에 대한 SWSCI의 분석을 통해 SPI와 동일한 기준으로 가뭄감시에 활용될 수 있다고 판단된다. Table 4는 SWSCI와 기존 가뭄지수들을 이용하여 일반적으로 적용되고 있는 가뭄분류 기준을 나타내고 있다.

Fig. 9는 1994~1995년 가뭄기간에 가장 심각한 가뭄이 발생했던 낙동강 권역의 안동댐에 대한 WSCI

및 SWSCI와 기존 가뭄지수들의 시계열을 나타내고 있다. 이 기간의 SWSCI는 정부에서 가뭄대책을 수행했던 기간인 1994년 5월부터 1995년 9월까지 전 기간에서 0 이하를 기록하고 있으며, 1995년 2월부터 7월까지의 WSCI가 1개월 이하로 추가적인 강수량이 없을 경우 유효저수량이 고갈될 위험에 직면했음을 알 수 있다. 월강수량과 3개월 누가강수량에 의해 좌우되는 SWSCI와 SPI는 심한 가뭄 상황에서도 Table 4의 가뭄의 심도를 나타내주지 못하고 있다. SPI9의 경우도 실제 가뭄상황에 비하여 정도가 심하게 나타나지 않고 있다. PDSI의 경우는 실제상황과 비슷한 심한 가뭄상황을 보여주고 있으나 가뭄 종료상황에서 다른 지수들은 이를 잘 반영하고 있는데 반하여, 심한 가뭄이 지속되는 것으로 나타나고 있다. SWSCI의 경우는 지속되는 극심한 가뭄상황을 다른 지수들보다 잘 재현해 주고 있다.

Table 4. Drought classifications of SPI, SWSI, PDSI, and SWSCI

SWSCI, SPI	PDSI, SWSI	Drought Category
+2.00 or more	+4.0 or more	Extremely moist
+1.50 to +1.99	+3.0 to +3.9	Very moist
+1.00 to +1.49	+2.0 to +2.9	Unusually moist
+0.99 to -0.99	+1.9 to -1.9	Near normal
-1.00 to -1.49	-2.0 to -2.9	Moderate drought
-1.50 to -1.99	-3.0 to -3.9	Severe drought
-2.00 or less	-4.0 or less	Extreme drought

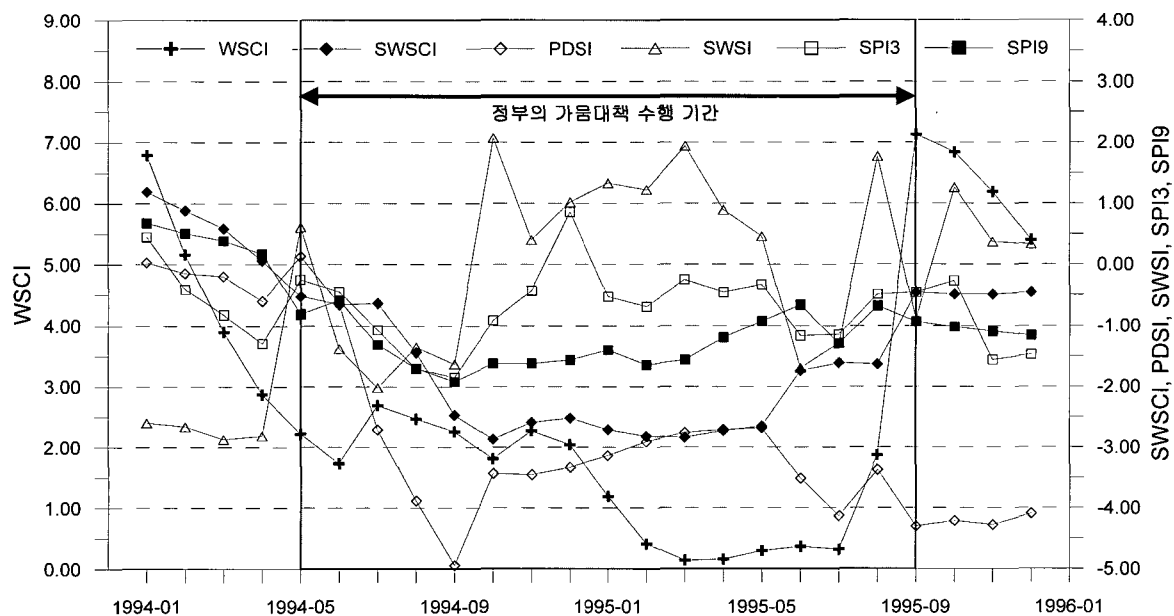


Fig. 9. Comparisons WSCI and SWSCI with other drought indices in Andong dam

7. 결 론

본 연구에서는 월별 계획된 공급량에 대한 저수지의 공급능력을 적절하게 평가하고 가뭄기간에 효율적인 저수지의 운영을 위한 지표를 제시하기 위해 WSCI를 개발하였다. WSCI는 극심한 기상조건하에서 각 저수지가 계획된 공급량에 대해 어느 정도 기간 동안 용수를 공급할 수 있는가를 평가한 척도이며, 기존 가뭄지수들과 유사한 기준 하에서 비교 및 이용이 가능토록 SWSCI를 함께 제시하였다. 본 연구에서 개발한 WSCI 및 SWSCI를 우리나라의 10개 다목적댐에 적용하였으며, 그 결과를 검토함으로써 다목적댐의 용수공급능력에 대한 안정성을 평가하였다.

WSCI를 이용하여 10개 다목적댐의 용수공급능력을 평가한 결과, 부안댐, 주암댐, 주암조절지댐, 안동댐, 소양강댐의 용수공급능력이 비교적 안정적인 것으로 나타났다. 그 밖의 댐들은 가뭄발생 시 물 공급의 안정성을 확보하기 어려운 상황인 것으로 파악되었다. 과거 가뭄발생 시 각 댐에서는 물 공급이 불가능한 긴급한 상황에 직면한 사례가 여러 차례 발생했던 것으로 나타나고 있었으므로 본 연구에서 개발한 WSCI 및 SWSCI를 이용하여 지속적인 모니터링을 수행함으로써 보다 효율적인 저수지 운영이 가능할 것이다. 따라서 이들 지수를 이용함으로써 저수지 운영 시 적절한 의사결정을 위한 효과적인 판단기준 제공이 가능하며, SWSCI를 적용함으로써 수요와 공급 측면을 고려한 가뭄심도의 설정이 가능하다는 점을 확인할 수 있었다.

상관분석을 통해 SWSCI와 기존 가뭄지수들 간의 상관도를 파악한 결과, 0.1~0.7 정도로 전반적으로 높지 않은 상관성을 보여주고 있었다. 이는 기존 가뭄지수들이 강수량 등 기상학적 인자를 위주로 산정되었기 때문에 저수지 저수량과 수요량을 고려하는 SWSCI와는 다른 양상을 보이기 때문이다. 그러나 극심한 가뭄이 발생하여 장기간 지속되었을 경우에는 기존 가뭄지수들과 SWSCI 간에 상대적으로 높은 상관관계가 나타나고 있었다. 평상시 비교적 낮게 나타나는 상관관계는 SWSCI가 가뭄심도를 파악할 판단기준으로써 부적절함을 의미하는 것이 아니라 용수수요와 공급 측면에서 기존 가뭄지수를 보완할 수 있는 지표라는 점을 알려주는 결과라고 판단된다. WSCI는 유역의 강수량과 저수지의 유입량이 전혀 없는 상황을 가정하고 산정된 값이므로 장기간의 극심한 가뭄 시에는 상대적으로 정확한 기준을 제시할 수 있을 것이며, 해당 저수지가 현재의 저수량으로 공급할 수 있는 최소 기간이라고 이해될 수 있다.

본 연구에서는 관측된 저수지 유입량 자료를 이용하

여 WSCI의 산정을 수행하였으나, 이는 저수지 운영에 있어 최소한의 기준을 파악하기 위함이며, 익월부터 발생 가능한 저수지 유입량을 예측하여 WSCI를 예측 적용한다면 실무에서 보다 유용하게 저수지 운영에 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 1-5-2)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김상민, 박승우 (1999). “우리나라 주요 지점에 대한 가뭄지수의 산정과 비교,” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제41권, 제5호, pp. 43-52.
- 김선주, 이광야, 신동원 (1995). “관개용 저수지의 한발 지수산정,” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제37권, 제6호, pp. 103-111.
- 류재희, 이동률, 안재현, 윤용남 (2002). “가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp. 397-410.
- 신사철, 김철준 (2003). “우리나라에서의 가뭄발생지역 판별을 위한 식생지수(NDVI)의 적용성에 관한 연구,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 839-849.
- 윤용남, 안재현, 이동률 (1997). “Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 317-326.
- 이동률 (1998). **한국과 미국대륙의 가뭄에 대한 엘니뇨의 영향**, 책임연구과제 보고서, 건기연 98-078, 한국건설기술연구원.
- 이동률 (1999). “엘니뇨/남방진동과 한국의 가뭄과 관계,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제2호, pp. 111-120.
- 이동률 (2002). “국가가뭄관리 시스템의 구축방안.” **2002 가뭄대책 심포지움 - 가뭄의 진단과 가뭄극복 종합대책**, 한국방재협회, pp. 121-156.
- 이동률, 이대희, 강신욱 (2003). “가뭄 경보기준과 모니터링 시스템.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제 36권, 제 3호, pp. 375-384.
- 이재웅, 유재복 (2003). “유역 가뭄 예·경보 기법 개발,” **한국토목학회논문집**, 한국토목학회, 제23권, 제 6B호, pp. 499-506.
- 임경진, 심명필, 성기원, 이현재 (2001). “다양한 시계열

- 을 이용한 가뭄지표 산정.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제 34권, 제 6호, pp. 673-685.
- 조홍제 (1996). “도시지역 용수관리를 위한 가뭄 예경보지수에 관한 연구,” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제1호, pp. 221-233.
- 한국수자원공사 (2000). **다목적댐 운영 실무편람**, 한국수자원공사
- 한국건설기술연구원 (2002). **가뭄관리 종합대책 수립 연구**, 한국수자원공사
- Alley, W.M. (1984), “The Palmet Drought Severity Index : Limitations and Assumptions.”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, pp. 1100-1109.
- Lee, D.-R., and Salas, J.D. (2001), “Relationships Between ENSO and Droughts in Korea and the Continental U.S.,” *Water Engineering Research*, Korea Water Resources Association, Vol. 2, No. 2, pp. 139-148.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). “Drought Monitoring with Multiple Time Series,” *8th Conf. on Applied Climatology*, Boston, American Meteorological Society.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*, U. S. Weather Bureau.
- Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). “Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas,” *Western Snow Conf.* pp. 164-175.
- Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V.K., and Wood, D.A. (eds.) (2000). “Early Warning Systems for Drought Preparedness and Management”, *Proceedings of Experts Group Meeting*, Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization

(논문번호:05-84/접수:2005.06.21/심사완료:2006.01.17)