

수문학적 가뭄감시를 위한 하천유량 기반 가뭄지수 개발

유지영* · 김태웅** · 김정엽*** · 문장원****

Yoo, Jiyoung* · Kim, Tae-Woong** · Kim, Jeong-Yup*** · Moon, Jang-Won****

Development of Drought Index based on Streamflow for Monitoring Hydrological Drought

ABSTRACT

This study evaluated the consistency of the standard flow to forecast low-flow based on various drought indices. The data used in this study were streamflow data at the Gurye2 station located in the Seomjin River and the Angang station located in the Hyeongsan River, as well as rainfall data of nearby weather stations (Namwon and Pohang). Using streamflow data, the streamflow accumulation drought index (SADI) was developed in this study to represent the hydrological drought condition. For SADI calculations, the threshold of drought was determined by a Change-Point analysis of the flow pattern and a reduction factor was estimated based on the kernel density function. Standardized runoff index (SRI) and standardized precipitation index (SPI) were also calculated to compared with the SADI. SRI and SPI were calculated for the 30-, 90-, 180-, and 270-day period and then an ROC curve analysis was performed to determine the appropriate time-period which has the highest consistency with the standard flow. The result of ROC curve analysis indicated that for the Seomjin River-Gurye2 station SADI_C3, SRI30, SADI_C1, SADI_C2, and SPI90 were confirmed in order of having high consistency with standard flow under the attention stage and for the Hyeongsan River-Angang station, SADI_C3, SADI_C1, SPI270, SRI30, and SADI_C2 have order of high consistency with standard flow under the attention stage.

Key words : Drought Index, Low-flow, Standard Flow, Change-Point, ROC Curve Analysis

초 록

본 연구에서는 하천의 갈수관리를 위한 기준유량과 가뭄지수와의 일관성 분석을 수행하기 위해서, 국토교통부 홍수통제소에서 고시한 37개 갈수예보 관리지점 중 섬진강 수계의 구례2지점과 형산강 수계의 안강지점을 대상으로 하여 관측된 일별 유량 자료를 구축하였으며, 더불어 인근 기상 관측소 남원지점과 포항지점의 강우량 자료를 활용하였다. 본 연구에서는 하천 유량자료를 기반으로 한 수문학적 가뭄상황을 재현해줄 수 있는 유량누가가뭄지수(SADI)를 개발하였다. SADI는 유량패턴의 변동시점(Change-Point) 분석을 통해 가뭄절단수준을 결정하였고, 또한 감소계수 추정을 위해 핵밀도함수를 이용하였다. 이처럼 계산된 SADI는 표준유출지수(SRI), 표준강수지수(SPI)와 비교되었으며, 이 중 SRI와 SPI는 30일, 90일, 180일, 270일 시간단위에 대한 가뭄지수를 모두 산정한 후, ROC 곡선 분석을 이용하여 갈수예보 기준유량과 일관성이 가장 높은 시간단위를 최종 결정하였다. 갈수예보 지점의 관심단계 예보기준유량을 기반으로 하여 다양한 가뭄지수와의 ROC 곡선 분석을 실시한 결과, 섬진강 수계의 구례2지점은 SADI_C3, SRI30, SADI_C1, SADI_C2, SPI90의 순으로 갈수예보의 정확도가 높은 것으로 나타났다. 또한, 형산강 수계의 안강지점은 SADI_C3, SADI_C1, SPI270, SRI30, SADI_C2의 순으로 갈수예보의 정확도가 높은 것으로 나타났다.

검색어 : 가뭄지수, 갈수예보, 기준유량, 변동시점, ROC 곡선 분석

* 종신회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 박사 (Hanyang University · jyoo84@gmail.com)

** 종신회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수 (Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

*** 종신회원 · 한강홍수통제소 수자원정보센터 시설연구사 (Han River Flood Control Office · cnujykim@korea.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jwmoon@kict.re.kr)

Received April 7, 2017/ revised May 18, 2017/ accepted May 19, 2017

1. 서론

가뭄에 대해 명확한 정의를 내리는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 수문순환을 구성하는 여러 가지 인자들의 복합적인 영향으로 인해 가뭄이 발생하며, 댐 등 인위적인 물 공급 시설이 있을 경우 단순히 강수량이나 하천유량으로 체감 가뭄을 표현하기 어렵기 때문이다. 그러나 일반적으로 가뭄은 비정상적인 수분 부족이 지속되어 나타나는 수문학적 현상으로 반복적으로 발생하는 정상적인 기후특성으로 정의된다. 비정상적인 수분 부족은 강수량의 부족이 주된 원인으로 이는 수문순환 과정 전체에 영향을 미쳐 하천유량, 지하수, 댐 및 저수지의 저수량 등의 부족으로 연결된다. 이와 같이 가뭄은 여러 가지 수문순환 요소들이 복합적으로 작용하여 나타나게 되므로 어떠한 요소를 중심으로 고려하느냐에 따라 서로 다양한 시각으로 정의되고 있다. 즉, 기상요소를 중심으로 가뭄을 정의하는 것을 기상학적 가뭄이라 하며, 작물의 생육에 영향을 주는 토양수분을 중심으로 고려하는 것을 농업가뭄이라 한다. 또한 하천유량, 지하수, 댐 저수량 등 물 공급원의 상황에 따라 물 부족이 발생할 경우를 수문학적 가뭄이라 한다.

그러므로 다양하게 나타나는 가뭄의 발생특성을 정량적으로 해석하기 위한 목적으로 다양한 가뭄지수가 개발되었으며, 대표적인 가뭄지수로는 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI), 표준유출지수(Standardized Runoff Index, SRI), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI) 등이 있다. 실제 가뭄의 해석에 가뭄지수를 활용하기 위해서는 각 가뭄지수의 장단점을 고려하여 적합한 지수를 선택적으로 활용하여야 한다. 그러나 지금까지 개발된 가뭄지수의 대부분은 기상학적인 요소를 중심으로 고려하고 있기 때문에 물 공급원의 상황을 고려하여야 하는 수문학적 가뭄의 경우에는 실제 가뭄상황을 적절히 나타내기 어려운 한계를 갖는다. 따라서 수문학적 가뭄은 수문순환에서 가용한 물의 부족한 정도를 바탕으로 판단할 수 있어야 하며, 하천유량, 댐 저수량 등과 같이 물 공급원에 대한 지표를 이용하여 가뭄수준을 판단하고 있다(Richard, 2002; Tallaksen and van Lanen, 2004; Tallaksen et al., 2009).

현재 우리나라 대부분의 하천에서 관측된 유량자료에 대한 기록 연한을 검토하면 1990년 후반을 시작으로 점차 신뢰성이 확보된 자료가 축적되고 있다. 하지만, 이처럼 구축된 유량자료에는 결측기간도 다수 존재하여 장기간의 자료를 기반으로 가뭄지수를 산정하는 데에는 사실상 어려움이 존재한다. 예를 들어 SPI나 SRI와 같이 적정 확률분포형 결정이 필요한 가뭄지수의 경우에는 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 최소 30년 이상의 관측자료 확보가 필요하며(Jung and Yoon, 2003), Moon and Lee (2012)는 우리나라

에서 PDSI를 이용하여 가뭄 모니터링을 수행하거나 가뭄특성 분석을 수행하기 위해서는 최소 40년 이상의 자료기간을 확보하고 분석에 활용해야 한다는 연구결과를 제시한 바 있다. 그러나 강수량에 비해 하천유량은 이러한 자료조건이 충족되는 관측지점을 확보하는데 어려움이 있다. 즉, 장기간의 자료가 축적되지 않은 경우에도 수문학적 가뭄상황을 효율적으로 나타낼 수 있는 가뭄지수 산정 방안을 검토하고 가뭄관리 업무에 활용할 수 있도록 할 필요가 있다.

Kwon et al. (2016)은 누적강수량의 장기간 패턴을 연속적으로 고려하여 누적 관측 강수량을 표준화하는 방법을 이용하는 새로운 가뭄지수인 강우누가가뭄지수(Rainfall Accumulation Drought Index, RADI)를 제안한 바 있다. RADI는 관측강수량의 전체 기간에 대한 강수 과부족 상태를 표준화하여 지수화한 것으로 SPI 산정 과정에서 확률분포형을 적용하기 위해 필요로 하는 자료 연한 조건에 대한 제약이 없다는 장점이 있다.

본 연구에서는 Kwon et al. (2016)이 제안한 RADI 산정방법을 활용하여 단기간의 관측유량을 기반으로 하는 수문학적 가뭄지수(Streamflow Accumulation Drought Index, SADI)를 개발하고 갈수관리에의 활용성을 검토하였다. SADI는 RADI의 방법론을 기반으로 하고 있으나 하천유량 자료의 특성을 고려하여 2가지 측면에서 방법론을 수정하였다. 첫째, 하천의 구조적, 비구조적 변화에 따른 유량패턴의 변동시점(Change-Point)을 반영할 수 있도록 함으로써 관측유량 자료의 특성이 변화하더라도 일관된 지수 산정이 가능하도록 하였다. Assani (2016)는 Lombard 방법을 이용한 변동시점 해석 연구를 통해 댐 건설 등과 같은 유역 내 다양한 구조적/비구조적 변화에 따른 영향에도 불구하고, 과거 수문자료를 기반으로 모니터링을 실시하고 수문해석을 수행하는데 있어 일관성 확보가 가능해진다는 점을 증명한 바 있다. 둘째, 관측 일을 기준으로 최근 유량의 영향은 크게 반영하고 그 전 시점의 유량에 의한 영향은 최근에 비해 감소시켜 반영하기 위해 가중치 개념을 적용하였으며, 이 과정에서 핵밀도함수(kernel density function)에 기반을 둔 감소계수 추정방안을 SADI 산정 과정에 반영하였다.

가뭄지수가 실제 가뭄관리나 갈수관리 등에 효율적으로 활용되기 위해서는 실제 하천이나 유역의 가뭄 또는 갈수 여부를 판단함에 있어 이용되는 기준과 일관된 관계를 나타낼 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 SADI의 적용성 및 실제 업무 활용 가능성을 판단하기 위한 방안을 검토하였다. 이를 위해 홍수통제소의 갈수예보 업무에서 활용되고 있는 기준유량을 수집하고 해당 기준유량을 이용한 가뭄판단 결과와 본 연구에서 개발된 SADI 및 기존 가뭄지수(SPI와 SRI) 산정 결과를 비교 검토하였다. 기준유량 기반 가뭄판단 결과와 여러 가뭄지수 사이의 일관성을 객관적으로 검토할

수 있도록 통계적 기법인 ROC 곡선 분석을 수행하여 그 결과를 평가하였다.

$$MDS_i = \frac{\sum_{j=1}^N S_{i,j}}{N} \quad (1)$$

2. 배경이론 및 이용자료

2.1 표준강수지수(SPI) 및 표준유출지수(SRI)

McKee et al. (1993, 1995)은 기상학적 측면에서 상대적으로 물의 수요에 비해 물의 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의해 가뭄이 시작된다는 점에 착안하여 SPI를 개발하였다. SPI를 산정하기 위해서는 우선 누적시간 단위별 강수시계열을 구성하여야 하며, 특정한 시간 단위에 해당하는 누가강수 시계열을 산정한다. 이를 기반으로 각각의 특정 시간 단위별 확률분포함수를 추정하며, 누가 확률 값에 해당하는 표준정규변량을 추정함으로써 최종적으로 SPI가 산정된다. 일 단위 SPI의 개념은 월 단위 SPI와 개념적으로는 동일하며, SPI의 계산을 위해 누가강수 시계열을 구축하는 과정에서 일 강수량을 다양한 시간단위(30일, 90일, 180일, 270일 등)를 고려하여 일별 누가강수 시계열을 구성한다. 구성된 시계열 자료에 대한 확률분포함수를 추정한 후, 해당 누가확률 값에 해당하는 표준정규변량을 역 추정한 결과가 최종적으로 일별 SPI로 산정된다. SRI는 SPI 산정방법과 동일한 과정으로 가뭄지수가 계산되며, 다만 입력자료가 강수량이 아닌 유량자료가 사용된다는 점이 다르다. 이처럼 SPI와 SRI는 가뭄지수 사용 목적에 따라 단기/장기 시간단위 설정에 따른 가뭄지수 산정이 가능하며, 동시에 계산과정이 비교적 단순하여 활용성이 높다는 장점이 있다. 다만, 월 또는 일별 확률분포형을 결정하기 위해서는 최소 30년 이상의 장기간 자료가 요구된다는 특징이 있다(Guttman, 1994).

2.2 유량누가가뭄지수(SADI)

강수누가가뭄지수(Rainfall Accumulation Drought Index, RADI)는 누적강수량의 장기간 패턴을 연속적으로 고려하여 장기 간의 자료연한(30년) 조건이 충족되지 않아도 통계학적으로 유의성 문제가 발생하지 않도록 제안된 가뭄지수이다. 본 연구에서는 RADI의 방법론이 하천유량에 보다 적합할 것으로 판단하였으며, 강수량 대신 하천유량을 이용한 유량누가가뭄지수(Streamflow Accumulation Drought Index, SADI)를 산정하였다. SADI는 장기간 평균인 기대유량(Cumulative Mean Daily Streamflow, CMDS)에 대한 누적 관측유량(Cumulative Observed Streamflow, COS)의 부족량 비율을 통해 계산된다. 즉, CMDS를 추정하기 위해서는 1년을 365일로 하여 전체 연도의 특정일에 대한 유량을 평균한 일평균유량(Mean Daily Streamflow, MDS)을 계산한다.

여기서, i 는 1일부터 365일까지를 의미하며, N 은 전체 자료구축년 수, $S_{i,j}$ 는 j 년의 i 일에 해당하는 일유량이다. 이와 같이 산정된 MDS를 관측연도별로 해당 일에 할당하고, 이를 관측시작일부터 순번을 부여함으로써 NMDS (New Mean Daily Streamflow)를 산정한다.

또한, 현재를 기준으로 이전 시점의 유량에 대한 가중치를 적용하기 위해 혼합정규분포를 기반으로한 감소계수를 추정하였으며, 이는 CMDS와 COS를 산정하는 과정에서 모두 동일하게 적용된다. 감소계수는 관측일을 기준으로 최근 유량의 영향은 크게 유지하고, 그 전 유량의 영향은 최근 값에 비해 크게 감소시키기 위해 도입된 개념이다. 특정 일(i)의 기대유량 대비 누적 관측유량 수준은 Eq. (2)를 이용하여 편차로 계산 가능하며, 기대유량에 대한 부족 비율 (Proportion of DS to CMDS, PDS)은 Eq. (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$DS_i = COS_i - CMDS_i \quad (2)$$

$$PDS_i = DS_i / CMDS_i \quad (3)$$

이는 관개기와 비관개기 유량에 대한 과부족을 상대적으로 평가하여 가뭄기준에 일관성을 부여할 수 있는 장점이 있으며, 최종적으로 SADI는 Eq. (4)와 같이 PDS를 표준화하여 산정할 수 있다.

$$SADI_i = PDS_i / \sigma(\forall PDS) \quad (4)$$

2.3 수정된 SADI 산정방법

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 SADI 산정방법에서 유량자료 기반의 수문학적 가뭄지수를 산정함에 있어 보완이 필요한 것으로 판단된 2가지 사항에 대해 개선방안을 추가 적용하였다.

첫 번째는 수문 시계열 자료에서 평균 또는 분산이 변화하는 시점의 발생 유무를 검토한 후, 가뭄지수 산정과정에 필요한 절단수준의 크기를 재결정하기 위해 Lombard 기법(Lombard, 1987)을 적용하였다. 실제 수문 시계열 자료는 특정 장소에 설치된 관측소를 통해 수집된다. 고정식 관측소에서 수집되는 자료의 경우, 기후변화와 같은 자연적 변화 또는 관측소의 위치 변경이나 구조적인 하천환경 변화에 따른 인위적인 요인에 따라 수문자료의 평균 및 분산과 같은 통계적 특성이 변화할 가능성이 있다. 특히, 수위나 유량의 경우에는 인위적인 주변 환경 변화에 따른 변동성이 크게 나타나며,

이와 같은 인위적인 요인으로 인한 변동 특성을 갖는 수문 시계열 자료를 기반으로 수문해석을 실시할 경우 자연적으로 발생한 수문 특성을 제대로 반영하지 못하고 왜곡된 결과를 도출할 우려가 있다(Assani, 2016). Lombard 기법은 비모수적 검정통계량을 이용하는 통계적 가설검정 방법으로 “평균 또는 분산이 변화하는 구간이 존재하지 않는다”는 귀무가설에 대해 검정통계량이 95% 신뢰구간에 포함될 경우 수문 시계열 자료는 변동성이 없거나 완전한 변동성을 갖는다. 즉, 자연적인 변화에서 나타나는 완전한 변화로 판단하며, 검정통계량이 95% 신뢰구간을 벗어날 경우에는 특정한 시점으로 분리된 구간 사이에서 급격한 평균 또는 분산의 변화가 나타난다. 따라서 수문 시계열 자료는 자연적 변동 범위를 벗어나는 인위적인 변동 특성을 포함하고 있음을 나타내며, Lombard 기법은 이러한 변동시점(Change-Point)의 구분을 가능하게 한다. Lombard 기법의 수학적 표현은 Eq. (5)와 같다.

$$\theta_k = \begin{cases} \xi_1 (1 \leq k \leq \tau) \\ \xi_2 (\tau < k \leq T) \end{cases} \quad (5)$$

여기서, T 는 시계열 자료의 길이, τ 는 변화시점을, ξ_1 과 ξ_2 는 평균 또는 분산과 같은 통계적 특성을 나타내며, 귀무가설은 $H_0 : \xi_1 = \xi_2$ 이다. Lombard 기법의 검정통계량 도출 방법은 다음과 같다. n 개의 자료를 갖는 수문 시계열 자료 X_1, \dots, X_n 에 대해 수문 시계열 자료의 오름차순 순위를 R_k 라 하면, X_k 에 대한 순위 점수는 Eq. (6)과 같다.

$$Z_k = \frac{1}{\sigma_\varphi} \left\{ \varphi \left(\frac{R_k}{n+1} \right) - \bar{\varphi} \right\}, \quad k \in \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

여기서, $\varphi(u) = 2u - 1$ 이며, $\bar{\varphi}$, σ_φ^2 는 다음과 같다.

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n+1} \right), \quad \sigma_\varphi^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ \varphi \left(\frac{k}{n+1} \right) - \bar{\varphi} \right\}^2 \quad (7)$$

Lombard의 검정 통계량 S_n 은 Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$S_n = \frac{1}{n^2} \sum_{t=1}^{n-1} L_{t,t+1}^2 \quad (\text{여기서, } L_{T_1, T_2} = \sum_{l=T_1+1}^{T_2} \sum_{k=1}^l Z_k) \quad (8)$$

Eq. (8)을 통해 산출된 Lombard의 검정 통계량에 대한 검정은 단측검정 5% 유의수준 0.4614를 적용하였으며, 유의수준에 따른 검정 값은 Anderson and Darling (1952)에 의해 제시되었다. 귀무가설이 기각되었을 때, 수문 시계열에서 나타나는 급변 구간은

Eq. (9)를 최대화 하는 t 점을 추정함으로써 구분할 수 있다.

$$|\tilde{L}_{t,t+1}| = |L_{t,t+1}| / \sigma(t/T, t+1/T) \quad (9)$$

$$\sigma^2(u, v) = \frac{(1-u)^3(1+3u)/12 - (1-v)^3(1+3v)/12 - (1-v)^2(v^2 - u^2)/2}{12 - (1-v)^2(v^2 - u^2)/2} \quad (10)$$

두 번째는 가중치 개념을 이용하여 과거에 비해 최근 유량의 영향을 크게 반영하여 누가유량을 산정하는 방법을 수정하였다. 누가유량을 산정하는데 필요한 분포형을 결정하는 과정에서 확률 분포함수의 매개변수 산정이 직접적으로 필요하지 않은 핵밀도함수를 기반으로 감소계수를 적용하여 매개변수 산정 과정에서 나타날 수 있는 불확실성을 제거하였다. RADI 산정과정에서는 일정비율 감소 곡선방법을 대체하기 위해 Eq. (11)과 같이 2개의 지수함수를 결합한 혼합분포를 적용하였으나, 이때 감소계수의 적용 범위에 대한 객관적인 근거 및 혼합분포의 매개변수 설정에 대한 객관성 확보에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 Eq. (12)와 같이 Epanechnikov 핵밀도함수를 이용하여 감소계수를 결정하고, 더불어 감소계수의 최적 적용범위를 결정하고자 3일~자료의 수만큼 모두 검토하여 객관성을 확보하고자 하였다. Epanechnikov 핵밀도함수는 -1~0의 정의역을 갖으며 0~0.75의 공역을 갖는다. 이러한 특성을 이용하여, 정의역의 구간을 감소계수의 적용 범위인 3일-자료의 수만큼 분할하여 각각에 대응하는 값을 감소계수로 산정하여 SADI 계산에 적용하였다. Fig. 1은 수정된 방법에 의한 SADI 산정과정을 도식화하여 나타낸 것이다.

$$g(x) = 0.47 \times e^{-\left(\frac{(x+4)+40}{70}\right)^2} + 0.85 \times e^{-\left(\frac{(x+4)-60}{120}\right)^2} \quad (11)$$

$$f(x) = \frac{3}{4}(1-x^2) \quad (12)$$

2.4 대상유역 선정 및 자료 구축

국토교통부 홍수통제소는 생활공업농업 용도로 사용되는 이수 유량과 수질·생태 등 하천의 기능 유지에 필요한 하천유지유량을 고려하여 주요 하천의 37개 지점을 대상으로 하천관리유량을 산정하였으며, 이를 고려하여 관개기 및 비관개기에 대한 기준유량을 설정하고 갈수관리 업무에 활용하고 있다. 본 연구에서는 37개 갈수예보 지점의 관측유량 자료를 검토하였으며, 결측기간이 상대적으로 짧은 2개 지점(섬진강 수계의 구례2 지점, 형산강 수계의 안강 지점)을 SADI 적용 및 검증을 위한 대상 지점으로 선정하였다. Table 1은 대상 지점에 대해 산정된 갈수예보 기준유량을 나타내고 있다.

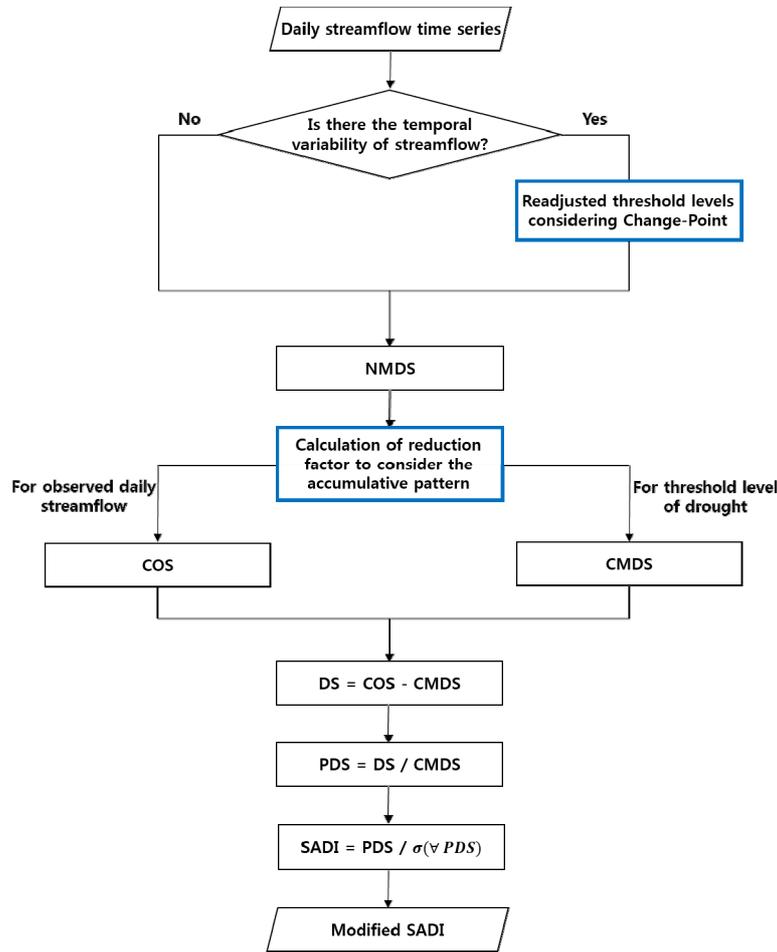


Fig. 1. Calculation Process of Modified SADI

Table 1. Standard Flow to Forecast Low-flow (Unit: m³/s)

Station (Basin)	Irrigation period (May to September)				Non-irrigation period (January to April, October to December)			
	Attention	Caution	Alert	Serious	Attention	Caution	Alert	Serious
Gurye2 (Sumjin River)	11.50	9.50	7.50	5.50	10.00	9.00	7.00	5.00
Angang (Hyungsan River)	3.41	1.74	1.19	0.84	3.36	1.44	1.15	0.81

섬진강 수계의 구례2 지점 관측유량은 1997년 1월 1일부터 2016년 6월 30일까지의 자료를 수집하여 이용하였으며, 형산강 수계의 안강 지점은 2002년 1월 1일부터 2016년 6월 30일까지의 자료를 수집하여 이용하였다. 더불어 하천유량 자료를 이용하여 산정되는 SADI와의 결과 비교를 위해 2개 지점 인근에 위치한 기상청 강우관측소를 선정 후 해당 지점 일 단위 강우량 자료를 수집한 후 SPI 산정에 이용하였다. 이와 같은 과정을 통해 선정된 기상청 관측소는 구례2 지점의 경우 남원 지점이며, 안강 지점은 포항 지점이다. 구축된 일 단위 관측유량과 강우량 자료는 SADI,

SPI 및 SRI 등 가뭄지수를 산정하는 데 직접 활용하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 일 단위 가뭄지수 산정

본 연구에서는 유량자료를 기반으로 수문학적 가뭄을 모니터링 할 수 있는 가뭄지수인 SADI를 제안하였다. SADI의 적용성을 판단하기 위해 가뭄지수 산정 결과와 홍수통제소의 갈수예보 기준 유량과의 비교 검토를 수행하였으며, 기존 가뭄지수 중 SPI와

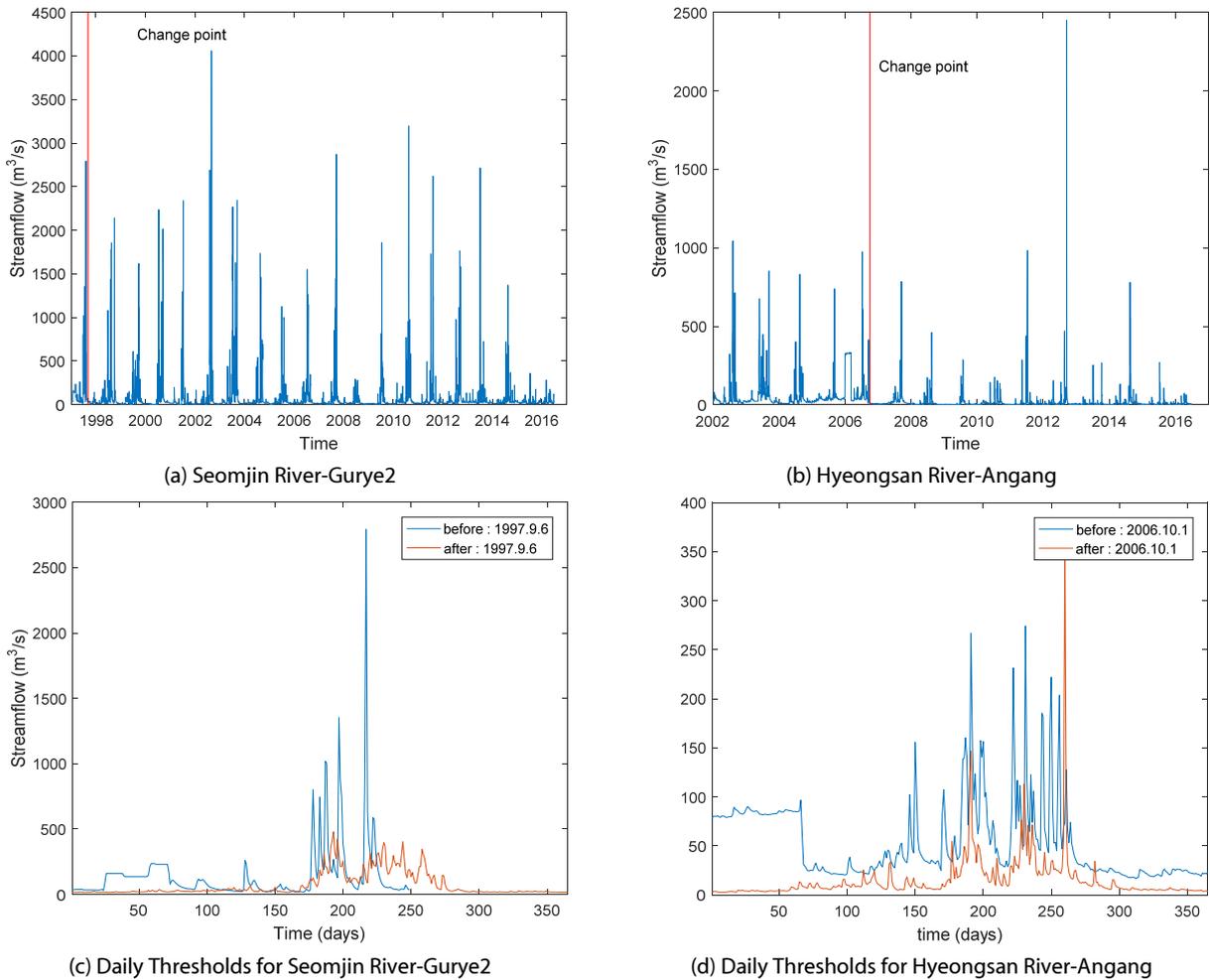


Fig. 2. Temporal Variability of Daily Mean Flows According to Change-Point

SRI도 함께 산정한 후 그 결과를 비교 검토함으로써 일관성 있는 가뭄정보를 제시하는 가뭄지수를 파악하였다.

선행연구를 기반으로 하여 앞서 제안한 첫 번째 개선방안을 적용하여 SADI를 산정하였다. 즉, 가뭄지수 산정 시 고려되어야 하는 가뭄 절단수준 개념에서 필요한 일 평균유량을 결정하기에 앞서, Lombard 기법을 적용하여 수문 시계열 자료의 변동시점 분석을 실시하였다. Lombard의 검정 통계량 산정 결과 5% 유의수준의 검정값 0.4614와 비교하였을 경우 매우 큰 값(섬진강-구례2 지점의 $S_n=8.98$ 이고, 형산강-안강 지점의 $S_n=155.95$)이 나타났다. 다시 말해 본 연구대상 지점의 관측유량 시계열은 특정 변동시점을 기반으로 평균 및 분산의 특성이 같지 않은 두 구간으로 분리될 수 있음을 의미한다. Fig. 2(a)와 같이 섬진강-구례2 지점의 1997년 9월 6일의 변동시점을 기준으로 나누어진 두 구간의 평균유량이 전(142.03m³/s)과 후(68.74m³/s)에 큰 차이를 나타내며, 형산강-안강 지점은 2006년 10월 1일의 변동시점을 기준으로 나누어진

두 구간의 평균유량이 전(55.32m³/s)과 후(14.62m³/s)에 큰 차이를 나타냈다.

앞서 검토된 유량자료 시계열의 변동시점 반영 여부에 따라 SADI를 개별적으로 계산하는 과정은 다음과 같다. 먼저, t 시점을 기점으로 분할된 구간에 대하여 Eq. (1)에서 정의한 일평균유량 MDS를 산정하여 각 구간에 대한 MDS를 각각 MDS₁과 MDS₂로 정의한다. 다음으로 변동 시점 이전의 경우 MDS₁을 사용하고 변동 시점 이후 기간에 대해서는 MDS₂를 적용하여 관측 기간에 대한 NMDS를 구축한다. 이후 동일한 SADI 계산과정을 적용하여 수문 시계열의 변동성을 고려한 SADI 결과를 도출한 결과는 Fig. 3과 같으며, 이는 형산강-안강 지점의 SADI 산정과정을 나타내는 그림이다. Fig. 3(a)는 기존 RADi 산정방법과 동일하게 CMDS를 계산하여 SADI를 산정한 경우(CASE 1)이며, Fig. 3(b)는 앞서 검토된 유량자료가 내포하는 변동시점(2006년 10월 1일)을 고려하여 CMDS를 재설정하여 SADI를 산정한 경우(CASE 2)이다.

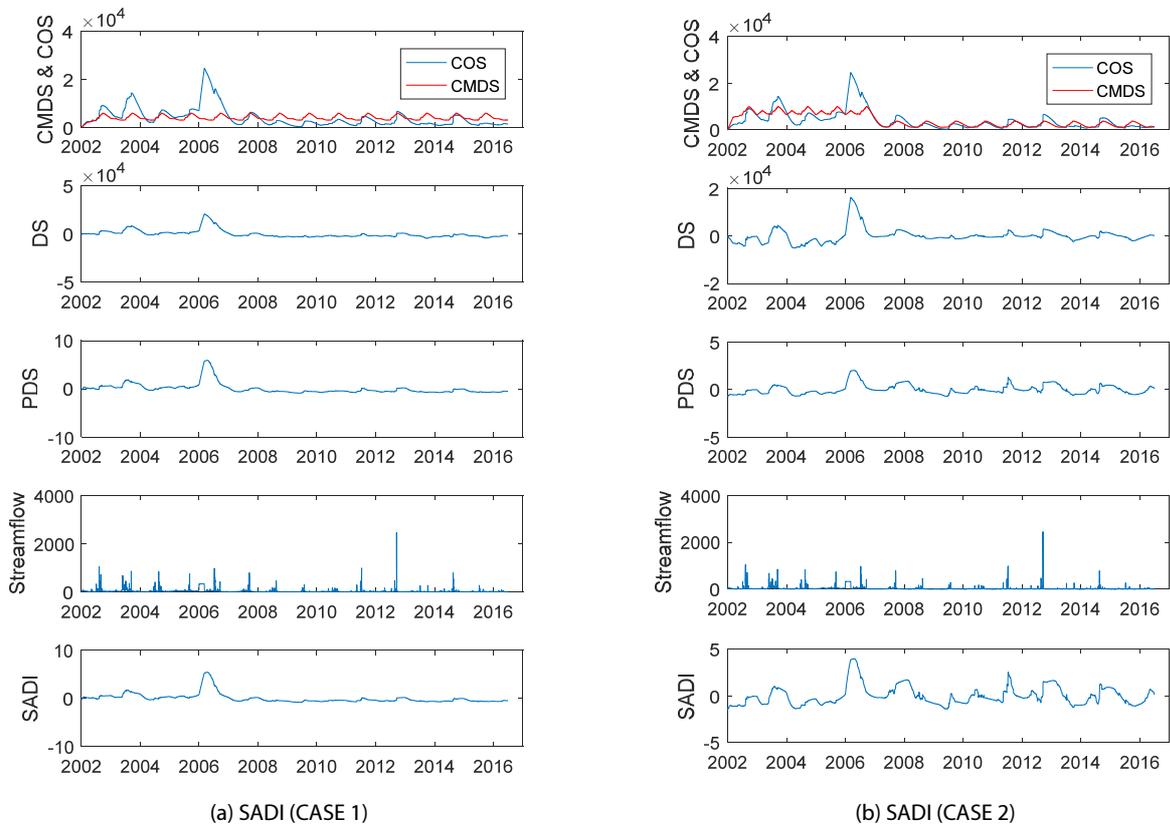


Fig. 3. SADI Results According to Two Methods for Hyeongsan River-Angang

두 번째 방안으로 관측일 기준 최근 유량의 수준은 크게 유지하고 그 전 시점의 유량에 대한 영향은 최근에 비해 감소시켜 반영하는 가중치 개념을 적용하는 것으로 핵밀도함수를 이용한 감소계수 추정을 통한 SADI (CASE 3)를 새롭게 산정하였다. 그 결과, Fig. 4와 같이 지점별 총 3가지 방법에 따라 SADI가 계산된다. 즉, 유량자료 시계열의 변동시점 반영 여부에 따라 차별적으로 고려된 가뭄 절단수준에 따른 가뭄지수의 영향은 CASE 1과 CASE 2에 대한 비교를 통해 해석이 가능하며, 가중치 개념을 적용하는데 있어 사용되는 분포함수에 따른 가뭄지수의 영향은 CASE 1과 CASE 3에 대한 비교를 통해 해석이 가능하다. Table 2는 본 연구에서 적용한 가뭄지수들의 기본 통계치를 정리하여 나타낸 것이다.

3.2 ROC 곡선 분석을 통한 갈수예보 기준유량과 가뭄지수 간의 일관성 평가

본 연구에서 사용된 섬진강수계 구례2 지점의 관측 유량은 약 20년 정도(1997년 1월 1일부터 2016년 6월 30일, 총 7116일)의 자료이며, 형산강수계 안강 지점의 관측 유량은 약 15년 정도(2002년 1월 1일부터 2016년 6월 30일, 총 5291일)의 자료이다. 각

지점별 갈수판단 기준유량에 따라 관심이하 등급이 발생한 비율을 검토해보면, 섬진강-구례2 지점은 약 14%, 형산강-안강 지점은 약 19%로 나타났다. 각 지점별 세부 단계별 분포비율을 검토한 결과, 섬진강-구례2 지점은 관심단계(26%), 주의단계(39%), 경계단계(19%), 심각단계(16%)로 나타나 주의단계의 발생비율이 상대적으로 큰 것으로 확인되었다. 형산강-안강 지점은 관심단계(92%), 주의단계(4%), 경계단계(3%), 심각단계(1%)로 나타나 관심단계의 발생비율이 대부분임을 확인하였다. 형산강-안강 지점의 관심단계가 발생한 시점을 재검토 해본 결과, 2010년 이후에 우리나라의 대표적인 가뭄발생시기로 알려진 해당기간에 대하여 해당지점에서도 장기간 연속적으로 갈수상황(관심단계(attention stage))인 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 하천의 갈수판단 정보와 더불어 다양한 가뭄지수와의 일관성 검토를 수행하기 위해 ROC 분석방법을 적용하였다 (Mason and Graham, 2002). ROC 분석은 ROC 곡선 아래의 면적(Area Under Curve, AUC)을 계산하여 일관성 평가를 실시한다. 즉, ROC 곡선 분석을 위해 설정한 모형은 실제 갈수예보 기준유량을 기준으로 가뭄을 판단하였을 경우, 관심단계 이하로 결정된 경우 가뭄지수에서도 보통가뭄 이하 등급으로 판단되는

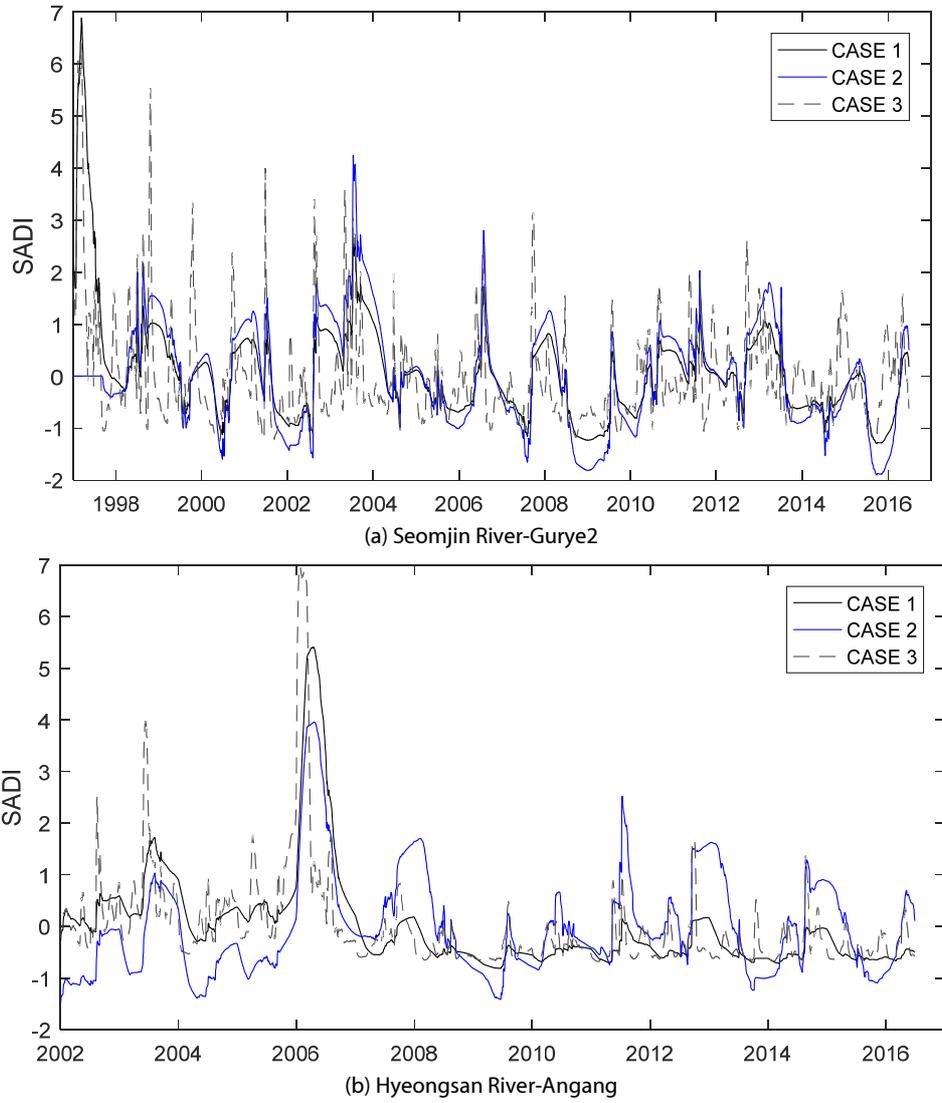


Fig. 4. SADI Time Series for Various Cases

Table 2. Basic Statistics of Various Drought Indices

Seomjin River-Gurye2		Min	Max	Mean	Hyeongsan River-Angang		Min	Max	Mean
SADI	Case 1	-1.298	6.889	0.065	SADI	Case 1	-0.812	5.410	0.008
	Case 2	-1.904	4.238	0.000		Case 2	-1.477	3.956	-0.017
	Case 3	-1.250	6.407	0.003		Case 3	-0.680	6.979	0.001
SPI	30	-3.522	2.735	0.001	SPI	30	-3.298	2.678	-0.008
	90	-3.609	2.583	0.002		90	-2.611	3.131	-0.001
	180	-3.218	2.655	0.001		180	-2.676	3.125	-0.001
	270	-3.156	2.518	0.001		270	-2.856	2.945	-0.001
SRI	30	-3.052	3.677	-0.006	SRI	30	-2.389	3.057	-0.028
	90	-2.860	3.715	-0.001		90	-2.226	3.069	-0.029
	180	-2.589	2.956	0.001		180	-1.758	3.101	-0.025
	270	-2.488	2.460	0.002		270	-1.451	2.894	-0.017

경우에 대해 일관성 있는 가뭄정보를 제공하고 있다고 판단하여 “성공(Hit, H)”, 그렇지 않다면 “잘못된 경고(Missing, M)”로 나타낸다. 반면, 실제 갈수예보 기준유량을 기준으로 가뭄이 아닌 정상상태라고 판단하였을 경우에 가뭄지수가 보통가뭄 이하 등급으로 판단하는 오류가 발생한다면 “실패(False, F)”, 그렇지 않다면 “음의성공(Negative hit, N)”으로 나타낸다. 이 중 성공(H)과 음의 성공(N)의 경우는 각각 참의 값으로 판단하고, 실패와 잘못된 경고는 거짓의 값으로 결정하여 예보의 적중률인 “갈수예보 기준유량과 가뭄지수 사이의 일관성”을 평가하고자 한다.

그 결과 Fig. 5와 같이 30일, 90일, 180일, 270일 시간단위에 대하여 산정된 SPI 및 SRI의 AUC 값을 검토하면 지점별 갈수예보 기준유량과 일관성이 상대적으로 높은 시간단위를 최종적으로 결정하는 것이 가능하다. 여기서 AUC의 범위는 0.5에서 1 사이의 값을 갖으며, 최종적인 ROC 곡선은 좌측 상단에 가까이 위치할수록 갈수예보 기준유량과 가뭄지수 사이의 일관성이 높다고 해석할 수 있다. Fig. 5(a)를 확인해 본 결과, 섬진강-구례2 지점은 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 SPI의 시간단위는 90일(AUC=0.658)이며, 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 SRI의 시간단위는 30일(AUC=0.755)인 것으로 확인된다. Fig. 5(b)를 확인해 본 결과, 형산강-안강 지점은 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 SPI의 시간단위는 270일(AUC=0.675)이며, 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 SRI의 시간단위는 30일(AUC=0.663)인 것으로 나타났다.

Fig. 6은 유량자료 시계열의 변동시점 반영 여부에 따라 차별적으로 고려된 두 가지 SADI (CASE 1과 CASE 2)에 대하여 추가적으로 갈수예보 기준유량과의 ROC 분석을 실시한 결과이다. 섬진강-구례2 지점의 경우에는 갈수예보 기준유량과 SRI30의 일관성이 가장 높은 것으로 나타났고, 두 가지 SADI (SADI_C1, SADI_C2)는 타 가뭄지수와 비교하여 상대적으로 낮은 AUC 값이 계산되었다. 반면 형산강-안강 지점의 경우에는 SADI_C1이 상대적으로 갈수예보 기준유량과 가장 큰 일관성을 보였으며, 다음으로는 SPI270, SRI30, SADI_C2의 순서로 확인되었다. 이러한 결과는 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 가뭄지수를 개선하는 데 있어, 기존 SADI의 첫 번째 개선방안으로 제시한 유량자료 시계열의 변동시점 반영 여부에 따라 변화된 가뭄 절단수준에 따른 영향은 크지 않다고 해석된다. 그러나 형산강-안강 지점과 같이 유량자료 연한 짧아 SRI를 산정하는 데 무리가 있는 지점에서도 SADI를 기반으로 생산된 가뭄정보는 갈수예보 기준유량과의 일관성 있는 정보 제공이 가능할 것으로 보이며, 갈수관리 업무수행에 있어 효용성이 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 갈수예보 기준유량과 가중치 개념을 적용하는 데 있어 사용되는 분포함수 선택에 따라 계산된 두 가지 SADI (CASE 1과 CASE 3)에 대하여 추가로 ROC 분석을 실시한 결과이다.

즉, 감소계수를 적용하기 위한 최적 시간의 적용범위를 산정하기 위해 최소 3일~최대 5,000일 동안에 Epanechnikov 핵함수를 이용한 감소계수를 산정한 후, 이에 따른 ROC 곡선 분석을 통해 AUC 값을 계산한 결과이다. 섬진강-구례2 지점과 형산강-안강 지점의 경우는 최적 시간의 감소계수 적용 범위는 모두 10일로 확인되었으며, 본 연구에서는 수정된 SADI (CASE 3)을 추가 가뭄정보로 고려하여 갈수예보 기준유량과의 일관성을 검토하였다.

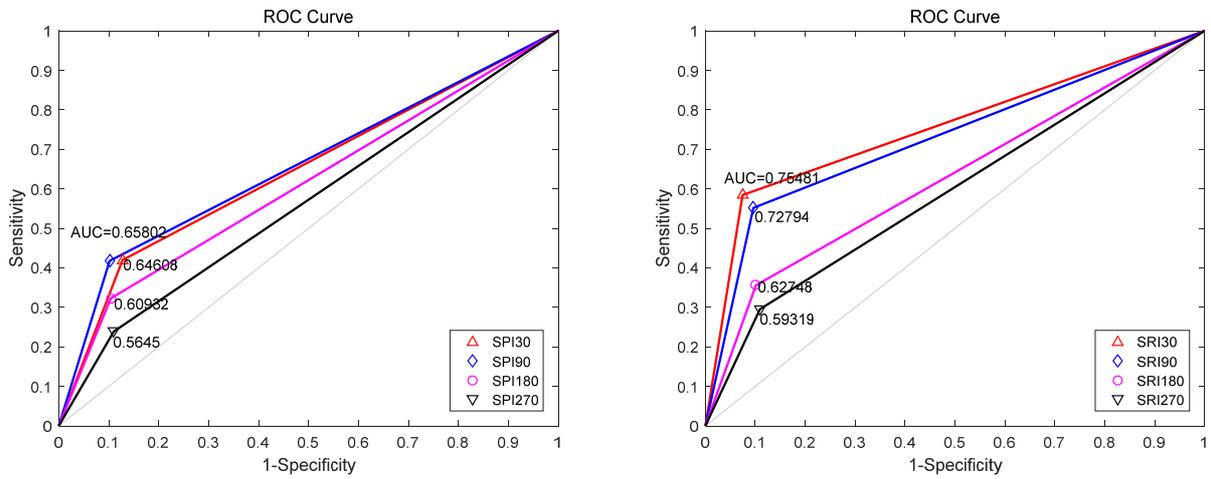
그 결과, 섬진강-구례2 지점과 형산강-안강 지점 모두 SADI_C3가 가장 큰 AUC 값을 나타내는 등 상대적으로 일관성이 높은 가뭄지수는 SADI (CASE 3)인 것으로 확인되었다. 섬진강-구례2 지점의 갈수예보 기준유량과 SADI_C3의 AUC 값은 0.807이며, 두 번째로 높은 일관성을 나타내는 SRI30 (AUC=0.755)과 차이도 큰 것으로 확인된다. 형산강-안강 지점의 갈수예보 기준유량과 SADI_C3의 AUC 값은 0.843으로 산정되었으며, 그 다음으로 높은 일관성을 보이는 지수는 SADI_C1 (AUC=0.711), SPI270 (AUC=0.675), SRI30 (AUC=0.663) 순으로 확인된다. 이러한 결과는 갈수예보 기준유량과 일관성이 높은 가뭄지수를 개선하는데 있어, 기존 SADI의 두 번째 개선방안으로 제시한 가중치 개념을 적용하는 데 있어 분포함수 선택에 따른 영향은 크다고 해석된다. 즉, SADI (CASE 1) 산정 시 적용된 감소계수 산정방법은 하천별 고유한 특성에 따른 유량의 지체시간을 반영하여 매개변수를 추정하는 데 한계가 있으며, 실제 SADI (CASE 3) 산정 시 적용된 핵도함수 기반의 하천별 유량의 지체특성을 최적화하여 감소계수를 추정한 결과, 실제 갈수예보 기준유량과의 일관성이 향상된 것으로 판단된다.

4. 결론

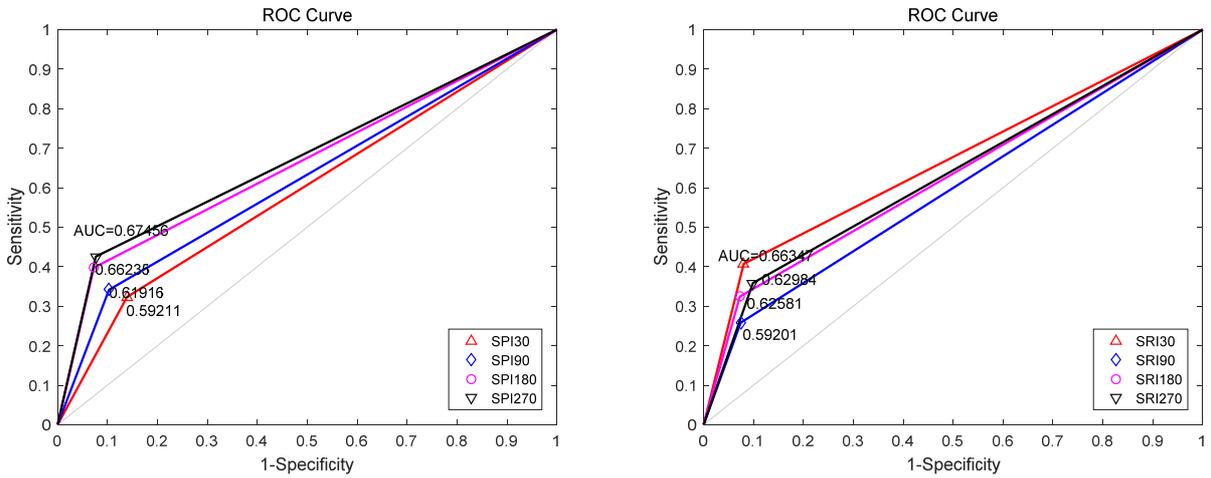
본 연구에서는 수문학적 가뭄을 모니터링하고 하천의 갈수관리를 수행함에 있어 활용할 수 있는 가뭄지수인 유량누가가뭄지수 (Streamflow Accumulation Drought Index, SADI)를 제시하였다. 본 연구를 통해 제시된 SADI의 실제 갈수관리 업무 활용성을 판단하기 위해 홍수통제소의 갈수예보 기준 지점(섬진강 수계의 구례2 지점, 형산강 수계의 안강 지점) 기준유량에 따른 갈수 판단 결과와 ROC 곡선 분석을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 섬진강-구례2 지점에 대해 지난 20년 동안의 관측유량 자료를 이용하여 갈수판단 기준유량에 따른 갈수상황을 판단한 결과, 관심단계 이하 등급이 14% 발생하였음을 확인하였다. 실제 관심단계 이하의 등급이 나타난 기간에 상대적으로 일관성이 높은 가뭄정보를 제공한 가뭄지수는 Epanechnikov

수문학적 가뭄감시를 위한 하천유량 기반 가뭄지수 개발

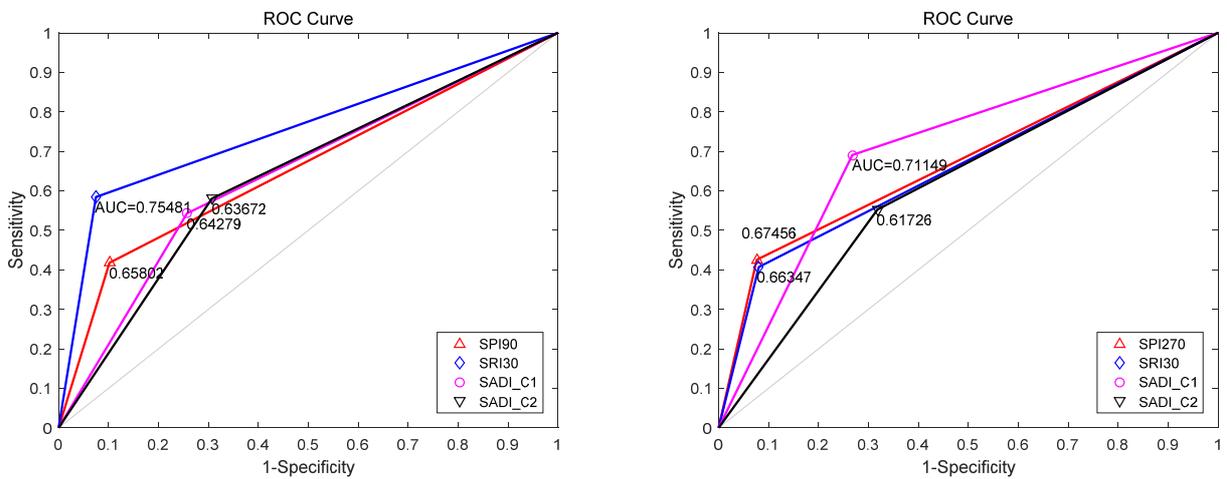


(a) Seomjin River-Gurye2



(b) Hyeongsan River-Angang

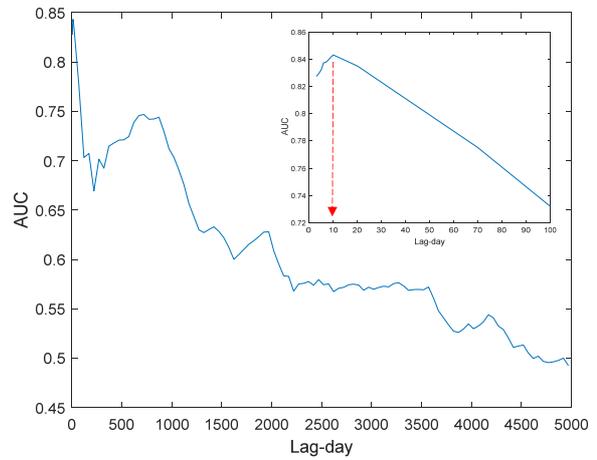
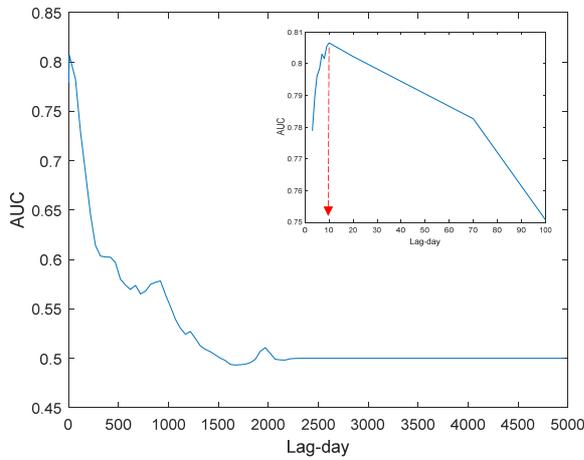
Fig. 5. ROC Curve Analysis Results of SPI and SRI below the Attention-Stage



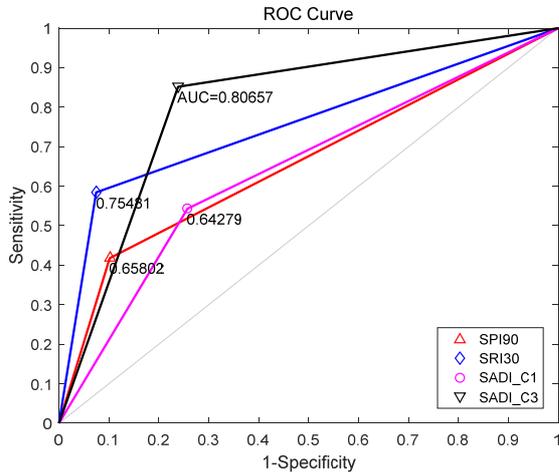
(a) Seomjin River-Gurye2

(b) Hyeongsan River-Angang

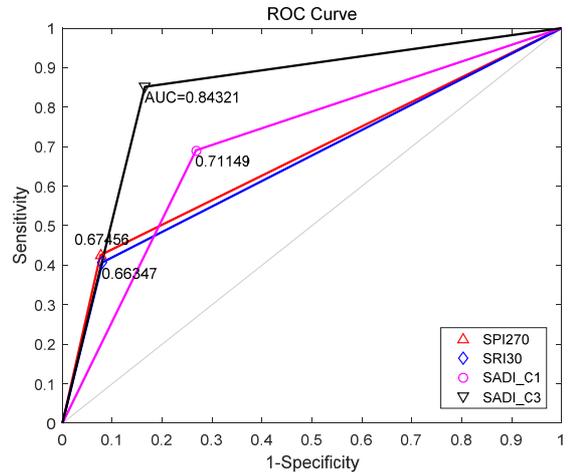
Fig. 6. ROC Curve Analysis Results of SPI, SRI, and SADIs for Two Methods (CASE1 VS CASE2) according below the Attention-Stage



(a) ACU of Epanechnikov Kernel Function for Seomjin River-Gurye2 (b) ACU of Epanechnikov Kernel Function for Hyeongsan River-Angang



(c) Seomjin River-Gurye2



(d) Hyeongsan River-Angang

Fig. 7. ROC Curve Analysis Results of SPI, SRI, and SADIs for Two Methods (CASE1 VS CASE3) according below the Attention-Stage

핵밀도함수를 기반으로 감소계수를 추정하여 산정된 SADI (CASE 3)와 30일 누기유량을 기반으로 산정한 SRI로 나타났다. 이것은 선행연구에서 사용한 혼합분포함수의 매개변수 추정 과정에서 발생하는 불확실성을 감소시키기 위해 핵밀도함수를 기반으로 최적의 감소계수 범위를 설정하여 수정된 SADI가 갈수관리에 효과적으로 적용될 수 있음을 예증하는 결과라 할 수 있다. 또한 섬진강-구례2 지점의 관측유량 기록년 수가 30년 미만인 점을 감안하였을 때, 통계학적으로 유의성을 지닌 가뭄정보를 제공하기 위해서는 SRI와 더불어 SADI (CASE 3)를 복합적으로 활용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

(2) 형산강-안강 지점은 지난 15년 동안 갈수판단 기준유량을 기준으로 관심단계 이하 등급이 19% 발생하였으며, 이 중 대부분은 2010년 이후에 발생한 가뭄으로 확인되었다. 실제 형산강-안강 지점의 관심단계 이하의 등급이 나타난 기간과

가장 일관성이 가장 높은 가뭄정보를 제공한 가뭄지수는 Epanechnikov 핵밀도함수를 기반으로 감소계수를 추정하여 산정된 SADI (CASE 3)로 확인되었다. 다만 그 다음으로 갈수판단 기준(관심단계)과 일관성이 높게 평가된 지수는 기존 선행연구 방안으로 산정한 SADI (CASE 1)인 것으로 확인되었다. 즉, 형산강-안강 지점에서도 섬진강-구례2 지점과 같이 SADI를 산정함에 있어서는 핵밀도함수를 기반으로 최적의 감소계수 범위를 설정하는 것이 효과적이라고 해석할 수 있으나, 형산강-안강 지점과 같이 유량 관측이 15년이 채 되지 않아 관측자료 기록년 수가 충분하지 않은 지점의 경우에는 SRI를 기반으로 가뭄정보를 생성하는 것 보다는 SADI를 활용하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

(3) 본 연구에서는 SADI를 개선하는 방안으로 수문 시계열 자료에서 평균 또는 분산이 변화하는 시점 분석을 실시하여, 지점별 변동시점 반영 여부에 따라 가뭄 절단수준을 차별적

으로 적용하였다. 그러나 섬진강-구례2 지점과 형산강-안강 지점에서는 변동시점 반영한 SADI (CASE 2)에 비하여, 변동시점을 반영하지 않고 기존 선행연구 방안으로 산정한 SADI (CASE 1)와 갈수판단 기준(관심단계)과의 일관성이 더 높게 평가되었다. 즉, 갈수판단 기준(관심단계)과 일관성이 높은 가뭄지수를 개선함에 있어 시계열의 변동시점 반영 여부에 따라 변화된 가뭄 절단수준의 영향은 미미하다고 해석된다. 다만 실제 Lombard 기법은 자연적인 변화에서 나타나는 완만한 변화가 아닌, 인위적인 주변 환경의 변화에 따른 수위와 유량의 변동시점을 분석하는 데 장점이 있다는 점을 감안하여 이에 적합한 특성을 지닌 하천을 대상유역으로 선정 후 향후 연구를 지속할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 한강홍수통제소의 갈수관리 체계 구축 과제의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원 및 자료 관련 많은 도움을 주신 한강홍수통제소 수자원정보센터에 감사드립니다.

References

Anderson, T. W. and Darling, D. A. (1952). "Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes." *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 23, pp. 193-212.

Assani, A. A. (2016). "The usefulness of the lombard method for analyzing the hydrological impacts of dams: The case of the Manouane River diversion dam, Quebec, Canada." *Water* 2016, Vol. 8, 410; doi:10.3390/w8090410.

Guttman, N. B. (1994). "On the sensitivity of sample L moments to

sample size." *Journal of Climate*, Vol. 7, No. 6, pp. 1026-1029.

Jung, J. H. and Yoon, Y. N. (2003). *Water Resource Design Practice*.

Kwon, M., Park, D. H., Jun, K. S. and Kim, T. W. (2016). "Development and application of drought index based on accumulative pattern of daily rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 1, pp. 41-49.

Lombard, F. (1987). "Rank tests for change point problems." *Biometrika*. Vol. 74, No. 3, pp. 615-624.

Mason, S. J. and Graham, N. E. (2002). "Areas beneath the relative operating characteristics (ROC) and relative operating levels (ROL) curves: Statistical significance and interpretation." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 128, pp. 2145-2166.

McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *Eighth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim CA, pp.179-186.

McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1995). "Drought monitoring with multiple time scales." *Ninth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Dallas TX, pp.233-236.

Moon, J.W. and Lee, D.R. (2012). "A study on the parameter stabilization of palmer drought severity index." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 12, No. 5, pp. 91-99.

Richard, R. H. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *B. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 83, pp. 1149-1165.

Tallaksen, L. M. and Van Lanen, H. A. J. (2004). "Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater." *Developments in Water Science* 48, Elsevier Science B.V., The Netherlands.

Tallaksen, L. M., Hisdal, H. and van Lanen, H. A. J. (2009). "Space-time modelling of catchment scale drought characteristics." *Journal of Hydrology*, Vol. 375, No. 3-4, pp. 363-372.