

가뭄지수의 적용성 분석을 통한 가뭄의 정량적 표현기법 개발

Development of Quantitative Drought Representation Methods by Drought Index Application

정상만*, 이주현**, 김이형***, 김하용****

Sang Man Jeong, Joo Heon Lee, Lee Hyung Kim, Ha Yong Kim,

Abstract

Drought is defined by differently for the several scientific and technical fields such as hydrological drought, agricultural drought, meteorological drought, climatological drought, atmospheric drought. A lot of drought indices have been developed to quantify drought severity levels. However these drought indices might be expressed differently as the drought conditions for specific period because the drought severity level is using different types of data on each condition. It is necessary for development of quantitative drought representation methods by drought index application.

In this research, the reaction to the historical droughts is analyzed after estimation of PDSI, SPI and MSWSI(Modified Surface Water Supply Index) in south korean territory. Lastly the drought representation methods were examiner combining the drought indices by drought indices.

The arithmetic mean drought indices that include PDSI, SPI, in yearly basis from 1971 to 2001 and MSWSI in yearly basis from 1974 to 2001 were estimated through the whole nation. The applicability of drought indices are examined based on the observed drought data for national and regional droughts. The result shows that PDSI, SPI(3), SPI(6), and MSWSI have proven to be sensitive enough to the historical drought.

The correlation analysis of each drought index was conducted whether they could show the long and short term drought equally. The analysis of how appropriately represent for the historical drought was used for determining for the combined drought index. Consequently, PDSI, SPI(3), SPI(6), and MSWSI have been appeared as suitable indices for the development of quantitative drought representation methods.

For the decision of weight on combining PDSI, SPI(3), SPI(6), and MSWSI, drought map was made for eighteen alternative to decide weight. The results showed that PDSI(20%), SPI(3)(60%), SPI(6)(10%), and MSWSI(10%) have been the most well matched weights. Using selected weights of each drought indices and by reconstructing the national mean drought severity on yearly basis, the fact that the year of historical drought is in accordance with the verified one for drought representation.

In short, the acquired technique using combined drought index can be used for useful and believable quantitative method of drought analysis.

keywords : PDSI, SPI, MSWSI, Drought Index, Drought Map

* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · E-mail : smjeong@kongju.ac.kr
** 정회원 · 중부대학교 사회기반시스템공학과 교수 · E-mail : leejh@joongbu.ac.kr
*** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학과 교수 · E-mail : leehyung@kongju.ac.kr
**** 정회원 · (주) 삼안 수력부 · E-mail : hykim@samaneng.com

1. 서론

최근 들어 지구촌은 지구온난화에 따른 기후변화에 의해 홍수 및 가뭄 등 자연재해가 빈발하고 있고, 산업화와 도시화에 따른 물수요가 급증하고 각종 오폐수의 증가로 수질오염이 심화되어 사용가능한 물의 양은 점점 줄어드는 심각한 상황을 맞고 있다. 이와 같은 여러 가지의 자연재해 중 가뭄은 그 특성상 홍수 등 기타 자연재해와는 달리 진행속도가 느리므로 시간적으로 대처할 여유가 많기 때문에 비록 진행중인 상태라 하더라도 그 진행상황을 초기에 감지한다면 가뭄에 의한 피해를 최소화할 수 있다. 가뭄과 관련하여 수행된 조사와 다양한 연구들은 기존에 개발된 가뭄지수들이 각각 독립적으로 가뭄을 평가할 수 있는 한계가 있으며, 하나의 지수보다는 다양한 지수들을 복합적으로 이용하는 것이 바람직하고 또한 추정치가 아닌 실측자료를 이용하여 가뭄을 평가해야 한다고 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 기상학적 가뭄심도를 표현하기 위한 가뭄지수인 PDSI, SPI와 수문학적 가뭄심도를 표현하는 지표수공급지수인 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index)를 우리나라 전역에 대하여 산정한 후 이를 통하여 가뭄을 모니터링하고 정량화하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 가뭄의 정의 및 가뭄지수 분석

2.1 가뭄의 정의

가뭄은 여러가지 면에서 일반 자연재해와 다른 특성을 가지고 있다. 첫째 가뭄의 영향은 상당 기간동안 완만히 누적되어 나타나게 되고 가뭄이 해갈된 후에도 수년 동안 과급효과가 나타날 수 있기 때문에 가뭄의 시작과 종료를 결정하기 어렵다. 둘째, 가뭄을 정확하고 일관성있게 정의하는 것이 어렵기 때문에 현재가 가뭄상황인지 아닌지에 대한 기준에 있어서 관점에 따라 상이한 견해를 가질 수 있다. 따라서 가뭄에 대한 정의는 많이 있으나 가뭄상태의 공표 기준은 다분히 임의적일 수 있다. 이와 같은 가뭄관리의 어려움은 기상, 수자원, 농업 및 사회경제 각 분야의 가뭄관리 담당자들이 서로 조금씩 다른 가뭄의 정의를 가지고 있고, 모든 학문분야 또는 현장에 적용될 수 있는 명확하고 일관된 가뭄에 대한 정의가 어렵다는 것을 의미한다.

2.2 가뭄지수의 산정

가뭄지수를 산정하기 위하여 건설교통부/한국수자원공사에서 관리·운영하고 있는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS), 국가지하수정보센터(GIMS)에서 제공하는 실시간 일자료(강우, 기온, 하천수위, 댐유입량, 지하수위)를 가뭄지수산정을 위한 입력 인자로 활용하였다. PDSI, SPI는 기상관측소별로 계산한 후 역거리법에 의해 공간분포 시키는 방법을 이용하였으며, MSWSI는 우리나라 전역을 댐 수혜지역, 하천수 수혜지역 및 지하수 수혜지역 등에 따라서 32개의 단위유역으로 구분한 유역별로 계산하였다. 기상자료는 전국 61개소의 강수량 및 기온 자료를 이용하였으며 수위자료는 WAMIS의 수위 자료와 한강홍수통제소의 수문조사연표에서 제공되는 자료를 이용하였다.

2.2.1 표준강수지수(SPI : Standardized Precipitation Index)

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right) \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (1)$$

$$SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right) \quad 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

여기서, $t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}$ $0 < H(x) \leq 0.5$, $t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)}$ $0.5 < H(x) \leq 1.0$, $H(x)$: 누적확률

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

2.2.2 과거가뭄심도지수(PDSI : Palmer Drought Severity Index)

$$Z = K_j d$$

$$X_i = X_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right) - 0.103X_{i-1} = 0.897X_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right) \quad (2)$$

여기서, K_j : 기후특성인자 ($j=1,2,\dots,12$), d : 수분편차(moisture deviation)

X : 가뭄지수, Z : 수분이상지수(moisture anomaly index), 아래첨자 i 는 해당 월

2.2.3 수정지표수공급지수(MSWSI : Modified Surface Water Supply Index)

$$MSWSI = \frac{a \times PN_{pcp} + b \times PN_{sf} + c \times PN_{rs} + d \times PN_{gw} - 50}{12} \quad (3)$$

여기서, PN : 비초과확률, a, b, c, d : 각 수문인자의 가중계수($a+b+c+d=1$),

pcp : 강수인자(precipitation component), sf : 하천유출인자(streamflow component)

rs : 저류량인자(reservoir component), gw : 지하수위인자(groundwater component)

3. 가뭄지수별 적용성 분석

본 연구에서는 기존 가뭄지수(PDSI, SPI)와 수문학적 가뭄지수(MSWSI)의 가뭄심도 표현정도를 확인하기 위하여 과거 가뭄사상들을 전국적인 가뭄, 지역적인 가뭄으로 분류하여 그 적용성을 검토하고 각각의 지수들의 가용여부를 판단하였다. 전국적인 가뭄은 관측소별로 산정된 각각의 가뭄지수들을 산술평균하여 전국평균가뭄지수를 산정하여 가뭄이 발생하였던 년도, 연강수량 부족년도 및 농업적 가뭄년도와 비교·검토하였으며, 지역적인 가뭄은 행정구역 단위로 1994, 1995년 및 2001년의 각각 가뭄지수들을 월 단위로 산정하여 가뭄피해 조사 지역(제한급수, 격일제급수, 급수중단 등 생활용수공급, 농업가뭄 피해)과 비교·검토하였다. 이는 차후 각각의 지수들의 사용여부를 판단하는 동시에 가뭄지수별 가중치를 결정하는데 중요한 지표로 이용하였다.

3.1 전국적인 가뭄에 대한 적용성 분석

전국적인 가뭄에 대한 적용성 분석을 위하여 과거 가뭄심도 평가를 위해 검토된 가뭄년도와 상대적인 연강수량 부족으로 인해 농업적 피해가 발생한 년도를 조사하여 1971년부터 2001년까지의 PDSI 및 지속기간별 SPI와 1974년부터 2001년까지의 MSWSI 값을 구하여 가뭄에 대한 반응을 분석하였다. 그림 1은 1971년부터 2001년까지의 PDSI값을 분석하여 ○은 가뭄년을 표시하고 △은 농작물 피해 발생년을 표시, □은 상대적인 강수량 부족년을 표시한 것이다. 다른 지수들도 그림 1과 같이 분석하였으며 표 1에 가뭄지수별 가뭄표현 현황을 나타내었다. 전국적인 가뭄에 대한 가뭄지수의 적용성 분석결과 PDSI, SPI(3), MSWSI, 및 SPI(6), SPI(12) 순으로 전국적인 가뭄을 잘 표현하고 있음을 알 수 있었다.

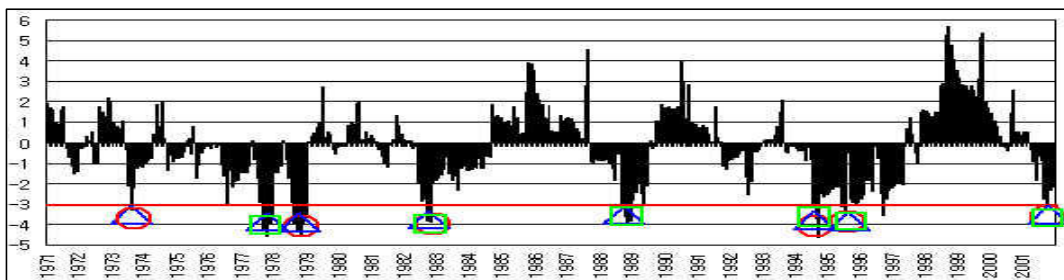


그림 1. 1971 ~ 2001년 PDSI

표 1. 1971 ~ 2001년 전국 가뭄지수표현 현황

연도	PDSI	SPI					MSWSI	연도	PDSI	SPI					MSWSI
		1	3	6	9	12				1	3	6	9	12	
1971							-	1987							
1972							-	1988	△, □		△, □	△, □			
1973	○, △		○, △				-	1989							
1974								1990							
1975								1991							
1976			△				△	1992							
1977	△, □		△, □	△, □				1993							
1978	○, △	○, △	○, △					1994	○, △, □		○, △, □	○, △, □	○, △, □	○, △, □	○, △, □
1979								1995	○, △, □	○, △, □				○, △, □	
1980								1996							
1981								1997							
1982	○, △, □				○, △, □	○, △, □	○, △, □	1998							
1983								1999							
1984								2000							
1985								2001	○, △, □		○, △, □				○, △, □
1986															

※ ○ : 과거 가뭄년도 △ : 과거 농업적 가뭄년도 □ : 과거 연강수량 부족년도

3.2 지역적인 가뭄에 대한 적용성 분석

지역적으로 각 지수가 가뭄을 평가하는 정도를 알아보기 위하여 최근에 발생한 가뭄인 1994, 1995, 2001년 가뭄을 기준으로 PDSI, SPI, MSWSI를 행정구역별로 산정하여 가뭄년도에 가뭄피해지역으로 조사되었던 지역과 그 지역의 가뭄지수와 일치율을 분석하고 또한 가뭄도를 작성하였으며, 1994 ~ 1995년 가뭄피해지역과 2001년 가뭄피해지역들을 기준으로 가뭄평가 결과를 지역적으로 비교·검토하였다. 표 2의 가뭄피해지역과 1994, 1995, 2001년 가뭄지수와 일치율을 보면 PDSI는 최대 84.5%의 일치성을 보이고 SPI(3), SPI(6)는 100%에서 67.5%의 일치성을 보이며 MSWSI는 최대 34.9%의 일치성을 보여 PDSI, SPI(3), SPI(6)가 가뭄에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다.

표 2. 가뭄피해지역과 1994, 1995, 2001년 가뭄지수와 일치율

1994년9월	일치수	지역수	일치율(%)	1995년8월	일치수	지역수	일치율(%)	2001년5월	일치수	지역수	일치율(%)
PDSI	77	88	87.50	PDSI	53	82	64.63	PDSI	11	83	13.25
SPI(1)	0	88	0.00	SPI(1)	0	82	0.00	SPI(1)	34	83	40.96
SPI(3)	57	88	64.77	SPI(3)	0	82	0.00	SPI(3)	83	83	100
SPI(6)	59	88	67.05	SPI(6)	0	82	0.00	SPI(6)	7	83	8.43
SPI(9)	59	88	67.05	SPI(9)	1	82	1.22	SPI(9)	0	83	0.00
SPI(12)	53	88	60.23	SPI(12)	1	82	1.22	SPI(12)	0	83	0.00
MSWSI	21	88	23.86	MSWSI	0	82	0.00	MSWSI	29	83	34.94

1994, 1995, 2001년의 PDSI, SPI, MSWSI를 산정하여 가뭄도를 작성하여 1994 ~ 1995년 가뭄피해지역과 2001년 가뭄피해지역들을 기준으로 가뭄평가 결과를 지역적으로 비교 검토하였으며 대표적으로 그림 2에 1994년의 월별 PDSI 가뭄도를 제시하였다.

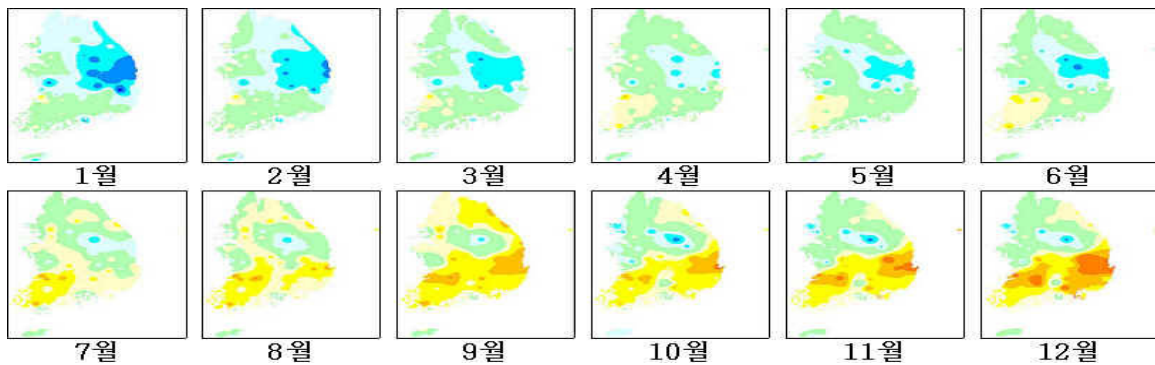


그림 2. 1994년 월별 PDSI

그림 2와 같은 각 가뭄지수를 분석한 결과 가뭄지수를 조합하여 가뭄을 정량적으로 표현할 때 SPI(3)는 단기가뭄을 표현하는 지표로 활용하고, 장기가뭄에 대한 지표는 SPI(6)를 활용하는 것이 가뭄에 대한 반응이 가장 좋은 것으로 분석되었다. SPI(9)와 SPI(12)는 지속기간이 너무 길어 가뭄에 대한 반응이 둔감하여 가뭄지수 조합시 적합하지 않으며 MSWSI는 가뭄에 대한 반응이 민감하지는 않지만 MSWSI를 가뭄지수의 조합에 사용하는 것이 기상학적 가뭄과 함께 수문학적 가뭄도 함께 고려할 수 있는 지수조합이라고 판단되었다.

4. 가뭄의 정량적 표현 기법 개발

4.1 가뭄지수별 상관관계분석

MSWSI, PDSI, 지속기간별 SPI와의 상관분석을 실시하였다. 상관분석은 변수들 간 관계의 유무를 확인하기 위해서 수행하는 것으로서 다음과 같은 식으로 상관계수를 산정한다.

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4)$$

여기서, ρ_{XY} 는 상관계수를 나타내며, 그 범위는 -1부터 1까지이고, $\sigma_X \cdot \sigma_Y$ 는 각 변수의 표준편차이며, $Cov(X, Y)$ 는 변수간의 공분산이다. 공분산은 두 확률변수 분포의 분산을 뜻하며 다음과 같이 산정한다.

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_X)(y_j - \mu_Y) \quad (5)$$

여기서, n 은 변수의 개수이며, μ_X, μ_Y 는 각 변수의 평균이다. 상관분석에 의해 계산되어지는 상관계수는 두 변수간의 공분산을 각 변수에 대한 표준편차의 곱으로 나누어 계산한다. 상관계수는 -1에서 1까지의 범위를 가지게 되며, 어떠한 단위의 측정값을 사용하여도 상관성에 대한 비교와 해석이 가능하게 된다. 상관성 분석은 통계와 함께 확률도 같이 고려해야 한다. 통계분석을 통한 상관계수(R) 값이 높더라도 확률분석을 통한 P값이 높으면 상관성이 없기 때문에 통계와 확률을 같이 고려하여 신중을 기해서 상관성 분석을 해야 한다. 본 연구에서 확률분석은 SYSTAT 9.0을 이용하여 P값을 산정하여 상관성 분석의 정확성을 뒷받침하였다.

1974년부터 2001년까지 전국 월 평균자료를 사용하여 상관분석을 실시한 결과, MSWSI와 PDSI와는 0.49의 상관성을 나타내었고, SPI 지수와는 3개월 지속기간의 SPI와 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 반면에 PDSI는 SPI(9) 및 SPI(12)와 높은 상관성을 나타내며 지속기간이 짧은 SPI와는 상관성이 적은 것으로 나타났다. 이것은 장기가뭄을 표현할 수 있는 PDSI를 사용할 경우에 SPI(9) 및 SPI(12)는 PDSI와 함께 고려될 필요성이 없으며 단기가뭄을 표현할 수 있는 SPI(3) 및 SPI(6)을 사용함으로써 가뭄을 정량적으로 표현함에 있어서 상호 보완적인 관계를 유지할 수 있을 것으로 분석된다. MSWSI는 PDSI 및 SPI(3), SPI(6)과 비교적 높은 상관성을 보이기 때문에 상당히 일관성 있는 가뭄강도의 표현이 가능할 것으로 기대된다.

표 3. 가뭄지수별 상관계수

구분	MSWSI	PDSI	SPI(1)	SPI(3)	SPI(6)	SPI(9)	SPI(12)
MSWSI		0.49	-0.02	0.58	0.44	0.35	0.27
PDSI	0.00		0.12	0.59	0.74	0.83	0.82
SPI(1)	1.00	0.512		-0.05	0.03	0.06	0.30
SPI(3)	0.00	0.00	1.00		0.64	0.48	0.37
SPI(6)	0.00	0.00	1.00	0.00		0.72	0.61
SPI(9)	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00		0.83
SPI(12)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

5. 결 론

본 연구는 다양한 분야에 대해 특정 목적을 가지고 있는 가뭄지수들 중에 기상학적 가뭄지수인 PDSI, SPI와 수문학적 가뭄지수인 MSWSI를 조합하여 신뢰성 있는 가뭄 감시를 위한 가뭄지수 개발을 위해 가뭄을 정량화하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 각 지수의 전국적인 가뭄 표현 현황을 분석하기 위하여 1971년부터 2001년 자료를 이용하여 각 지수별 가뭄심도를 구하여 최근에 발생했던 가장 극심했던 가뭄과 비교 검토한 결과 전국적인 가뭄은 여러 가지의 가뭄지수 중에서 PDSI, SPI(3), SPI(6), MSWSI가 비교적 잘 표현하는 것으로 분석되었다.
- 2) 지역적인 가뭄을 각 지수들이 표현하는 정도를 검증하기 위해서 가뭄연도별 가뭄피해지역이 정확하게 조사된 1994, 1995, 2001년의 가뭄을 기준으로 적용하였으며 PDSI와 MSWSI는 9단계, SPI는 7단계로 가뭄심도를 설정하여 가뭄도를 작성하여 지역별로 분포시켜 분석한 결과 PDSI는 지역별 가뭄상태를 잘 표현하고 특히 농업적 가뭄을 정확하게 표현하는 것으로 분석되었으며 SPI(3), SPI(6)은 지역별 가뭄피해 지역의 정량적인 표현은 양호하나 가뭄의 진행 상황은 PDSI에 비해서 반응이 낮은 것으로 분석되었다.
- 3) MSWSI의 가뭄의 지역별 표현은 PDSI 및 SPI에 비해서 신뢰성이 낮은 것으로 분석되었다.
- 4) 가뭄단계는 정상상태 (D0)에서 가뭄비상단계 (D4)까지 5단계로 구분하였으며 PDSI, SPI(3), SPI(6), MSWSI를 조합하여 가뭄강도를 결정하고 4개의 가뭄지수를 조합하여 최종적인 가뭄도를 작성하였다.

감 사 의 글

본 연구는 건교부, 한국수자원공사에서 수행중인 가뭄관리모니터링체계 수립 보고서의 일환으로 수집된 자료를 이용하였으며 자료를 제공해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1995). 가뭄기록조사 보고서.
2. 건설교통부 (2002). 가뭄기록조사 보고서.
3. 김선주, 이광야, 신동원 (1995). “관개용 저수지의 한발지수 산정” 한국농공학회지, 제6호, pp. 103-111.
4. 류재희, 이동률, 안재현, 윤용남 (2001). “가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구”, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 122-127.
5. 이동률 (1998). 한국과 미국대륙의 가뭄에 대한 엘리뇨의 영향, 책임연구과제 보고서, 건기연 98-078, 한국건설기술연구원.
6. 임경진, 심명필, 성기원, 이현재 (2001). “다양한 시계열을 이용한 가뭄지표 산정” 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제6호, pp. 673-685.
7. 한국수자원공사 (2001), 2001년 가뭄기록조사 보고서
8. 한국수자원공사 (2002). 가뭄관리 종합대책 수립연구 보고서, pp.48-128.
9. Guttman, N. B. (1998), "Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index", *J. of the American Water Resources Association*, 34(1), pp. 113-121.
10. MaKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1995), "Drought Monitoring with Multiple Time Scales Preprints," 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, TX, pp. 233-236.