

# 베이지안 네트워크를 이용한 기상학적 가뭄지수의 민감도 평가

유지영\* · 김진영\*\* · 권현한\*\*\* · 김태웅\*\*\*\*

Yoo, Ji-Young\*, Kim, Jin-Young\*\*, Kwon, Hyun-Han\*\*\*, Kim, Tae-Woong\*\*\*\*

## Sensitivity Assessment of Meteorological Drought Index using Bayesian Network

### ABSTRACT

The main purpose of this study is to assess the sensitivity of meteorological drought indices in probabilistic perspective using Bayesian Network model. In other words, this study analyzed interrelationships between various drought indices and investigated the order of the incident. In this study, a Bayesian Network model was developed to evaluate meteorological drought characteristics by employing the percent of normal precipitation (PN) and Standardized Precipitation Index (SPI) with various time scales such as 30, 60, and 90 days. The sensitivity analysis was also performed for posterior probability of drought indices with various time scales. As a result, this study found out interdependent relationships among various drought indices and proposed the effective application method of SPI to drought monitoring.

**Key words** : Meteorological drought, Bayesian network, Posterior probability, Sensitivity

### 초록

본 연구의 목적은 베이지안 네트워크 기법을 이용하여 기상학적 가뭄지수의 민감도를 확률론적으로 평가하는 것이다. 즉, 기상학적 가뭄에 관련 되는 다양한 지수 간의 상호연관성을 분석하여 가뭄지수 사이의 선후관계를 파악하였다. 이에 본 연구에서는 정상강우비율(PN)과 30일, 60일, 90일 지속기간 표준강수지수(SPI30, SPI60, SPI90)의 자료를 기반으로 베이지안 네트워크 모형을 개발하여 기상학적 가뭄특성을 평가하였으며, 다양한 시간단위(지속기간)에 따른 가뭄지수 간의 사후확률에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 결과적으로는 다양한 지수 간의 의존관계를 파악하였으며, 이를 활용하여 효율적인 가뭄감시를 수행할 수 있는 표준강수지수의 활용방안을 제시하였다.

**검색어** : 기상학적 가뭄, 베이지안 네트워크, 사후확률, 민감도

## 1. 서론

가뭄은 정의하는 관점에 따라 크게 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류할 수 있으며, 가뭄을 객관적으로 평가하는 수단으로 가뭄지수(Drought Index)가 활용되고 있다. 최근까지 전 세계적으로 가장 많이 통용되고 있는 가뭄지수는 1965년 Palmer (1965)에 의해 개발된 PDSI (Palmer Drought Severity Index)와 McKee et al. (1993)에 의해 개발된 SPI (Standardized Precipitation Index), Shafer and Dezman (1982)에 의해 개발된 SWSI (Surface Water Supply Index) 등이 있다. 이러한 지표들은 가뭄을 평가하기 위한 절대적인 지표라고는 할 수 없지만, 각 지수들이 갖고 있는 특징에 따라 이용자들의 목적에 맞게 선택적으로 활용되고 있다.

\* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 연구교수, 공학박사 (Chonbuk University · jyyoo84@gmail.com)

\*\* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Chonbuk University · jinyoungkim@jbn.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 전북대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (Chonbuk University · hkwon@jbn.ac.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received July 13, 2014/ revised August 27, 2014/ accepted October 12, 2014

이 중에서 특히 SPI는 다양한 시간 척도(time scale)에 대하여 적용이 가능하며, 기상학적 측면에서의 단기·장기적 가뭄을 효과적으로 설명할 수 있다는 장점을 가지고 있어 활발히 사용되고 있다. 이와 더불어, 정상강우백분율(Percent of Normal Precipitation (PN))은 기상학적 가뭄상태를 설명하는데 가장 간단한 방법 중 하나로, 30년 이상의 강우자료에 대한 정상년 강우(즉 장기간 평균치)를 설정하고, 해당 월의 강수량의 정상년 강우에 대한 백분율을 산정하는 것이다(Willeke et al., 1994). 하지만, 강수량 자료를 기반으로 계산된 가뭄지수라 하더라도 서로 다른 시간 척도를 가진 값들 사이에는 일관성이 없는 가뭄정보를 표출하는 경우가 발생할 수 있다는 문제가 지적된 바 있다(Kim et al., 2012). 예를 들어, 특정한 월의 가뭄상황을 판단하는 데 있어, 3개월 지속기간의 SPI와 6개월 지속기간의 SPI가 서로 일관성이 없는 가뭄정보를 제공할 경우 실제 가뭄상황을 판단하는데 혼란이 야기될 가능성이 있다.

따라서 기상학적 측면의 가뭄에 대한 종합적인 상황을 판단하기 위해서는 공통적으로 강수량 자료 기반으로 생성되는 다양한 시간 단위(지속기간)를 가지는 가뭄지수들 사이의 상호연관성에 대하여 객관적으로 검토될 필요가 있다. Kao and Govindaraju (2008)는 극치강우사상을 기반으로 한 다양한 변수별 종속구조를 표현하기 위해 코플라(copula)를 적용하였으며, Kao and Govindaraju (2010) and Kim et al. (2012)은 가뭄상황을 보다 종합적으로 판단하기 위해, 단기와 중기 가뭄을 포착할 수 있도록 1개월부터 12개월까지의 누적강수량을 이용하여 산정한 총 12개의 SPI (SPI-1, SPI-2, ..., SPI-12)를 주요 변수로 선택하여 코플라 기반의 결합가뭄지수를 제안한 바 있다. 본 연구에서는 기상학적 측면의 가뭄을 평가하는 데 있어 공통적으로 강수량 자료 기반으로 생성되는 기본적인 가뭄지수(PN and SPI)를 대상으로 각 지수들 간의 상호연계성 및 인과관계를 확률론적으로 검토하기 위하여 베이지안 네트워크 모형을 활용하였다.

최근 우리나라에서 베이지안 네트워크 모형을 이용한 연구가 다양한 분야에서 수행되고 있다. 특히, 통신, 의학, 농업, 사회경제학 등의 분야에서 베이지안 네트워크를 이용하여 다양한 인자간의 상호 의존성 및 연계성을 파악하는 연구가 활발히 진행되고 있다 (Kim and Ahn, 2011; Kim and Jung, 2013). 베이지안 네트워크 모형을 이용한 수문학적 응용의 연구는 주로 위험도 분석에 적용되고 있다(Li et al., 2010; Peng and Zhang, 2012; Sunwoo, 2012). Li et al. (2010)은 중국의 Heihe River 유역을 대상으로 홍수재해지도를 제작하기 위해 강수량, 지형학적 인자(경사, 고도), 풍속 등을 이용하여 베이지안 네트워크 모형을 구축하였다. Peng and Zhang (2012)은 총 343개의 댐 파괴에 따른 사망자 수를 이용하여 Human Risk Analysis Model (HURAM)을 개발하였다. 이때 인명손실과

위험 발생 시간, 홍수 증가 시간, 예·경보시간 등을 고려하여 댐 파괴시 배수와 예·경보 시간이 인명손실에 가장 중요한 영향을 미치는 요인인 것으로 밝혀진 바 있다. Sunwoo (2012)는 베이지안 네트워크를 이용하여 최적의 홍수방어대책을 수립하기 위하여 기 후특성뿐만 아니라 사회·경제적인 특성 등 다양한 변수간의 인과관계를 복합적으로 해석한 바 있다. 앞서 언급하였듯이 가뭄과 관련한 연구는 아직 공학적인 분야보다 농업 분야에서 일부 수행된 바 있다. Bashari et al. (2009)은 Bayesian Network 모형 구축 시 가뭄 존재 여부에 따른 동물의 방목, 식생, 토양 등 다양한 인자를 고려하여 호주 아열대 초원에 대해서 분석한 바 있다. 그러나 최근 수문학 분야에서 가뭄에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면 Bayesian Network를 이용한 가뭄연구 사례는 상대적으로 부족하다.

본 연구에서는 이러한 베이지안 네트워크 모형의 장점을 활용하여 가뭄의 확률론적 평가를 수행하였다. 이는 현재까지 국내외에서 수행된 사례가 없는 가뭄에 대한 베이지안 네트워크의 응용연구이다. 베이지안 네트워크 기반으로 한 가뭄지수의 민감도 평가를 통해 기존의 기상학적 측면의 가뭄판단 시 가뭄정보의 일관성이 결여되는 한계점을 극복하기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 PN과 일 단위 SPI를 이용한 가뭄 정의

일반적으로 가뭄을 정량적으로 평가하기 위한 방안으로 활용하기 위하여 다양한 가뭄지수가 개발되었으며, 가뭄지수를 산정하기 위해서는 강우, 응설, 하천유량, 지하수 등 가뭄 상황을 파악할 수 있는 지표들이 활용된다. 특히 강수의 부족은 기상학적 측면에서 가뭄의 주된 요인이라 할 수 있으며, 가뭄의 정량적 평가에 기본적으로 이용된다. 본 연구에서는 기상학적 가뭄을 대상으로 연구를 수행하였으며, 다양한 가뭄지수 중 PN과 일단위 SPI를 활용하였다.

PN은 특정 지점에 대한 강수량 분석의 가장 간단한 방법 중의 하나이다. 단일 지역이나 단일 기간에 적용할 때는 PN을 사용한 분석이 매우 효과적이며, 일반인들이 쉽게 이해할 수 있는 방법이기도 하다. PN은 특정한 달의 실제 월강수량을 정상강우로 나눈 후 백분율을 산정하여 지수로 표현한 것으로, 이때 정상강우는 해당 월의 30년 평균값이 사용된다. 이때 대상기간은 한 달이나 계절 또는 연 단위 등 다양하게 할 수 있으며, PN이 100% 이하일 경우는 평년과 비교하여 강우량이 부족한 상태임을 의미한다. 또한, PDSI나 SPI와 달리, PN은 단지 상대적인 강우부족비율을 나타내는데 활용되고, 가뭄의 심도를 구분하는 기준으로 활용되지는 않는다. 다만, 일부 연구에서 PN을 기준으로 가뭄심도를 분류하는데 활용한 바 있으며(Willeke et al., 1994; India Meteorological Department, 2010), 우리나라의 경우, 기상청에서 가뭄판단지수의

등급을 결정할 때 PN이 활용되고 있다.

우리나라의 과거 2001년 가뭄기록에서는 1904년 기상관측 이래 평년대비 20~30%에 불과한 수준의 강수량이 발생하여 가뭄이 가장 심했다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 평년대비 누적강수현황(30일)을 나타내기 위해 계산된 일단위 PN을 총 6개의 등급(A등급: PN < 20%, B등급: 20 ≤ PN < 40%, C등급: 40 ≤ PN < 60%, D등급: 60 ≤ PN < 80%, E등급: 80 ≤ PN < 100%, F등급: PN ≥ 100%)으로 구분한 후, 세분화된 강수량의 수준에 따른 가뭄상태를 검토하였다.

SPI는 가뭄의 단기 및 장기적인 특성을 복합적으로 해석하기 위하여 월별 강수시계열을 다양한 시간단위(3, 6, 9, 12개월 등)의 누가강수 시계열을 구성한 후, 각 시간단위별 강수 부족량을 고려하여 월 단위 가뭄지수를 계산한다(McKee et al., 1993). 그러나 월 단위 가뭄지수를 이용할 경우, 짧은 지속기간을 가지는 가뭄현상을 설명하는 데에는 한계가 있다(Yoo et al., 2013). 이에 본 연구에서는 30일, 60일, 90일 누가 강수 시계열을 구축하고 기상학적 측면의 단기가뭄을 해석할 수 있는 일 단위 SPI (SPI30, SPI60, SPI90)를 활용하였다.

일 단위 SPI의 개념은 McKee et al. (1993)이 개발한 월 단위 SPI와 개념적으로는 동일하며, SPI의 계산을 위해 누가강수 시계열을 구축할 경우에 일 강수량(daily precipitation)을 다양한 시간단위를 고려하여 일별 누가강수 시계열(daily cumulative precipitation time series)을 구성한다. 일별 누적평균 강수계열의 확률분포함수를 추정하여, 누가확률값에 해당하는 표준정규변량을 추정하면, 이는 최종적으로 일 단위 SPI가 된다. 본 연구에서는 Gamma 분포의 확률밀도함수(Eq. (1))와 누적분포함수(Eq. (2))를 이용하여 일 단위 SPI를 산정하였다(Yoo et al., 2013). 이처럼 산정된 일 단위 SPI는 Table 1과 같이 제시된 가뭄 분류기준에 따라 건조 및 습윤 상태를 판단한다.

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

Table 1. Definition of the SPI Categories and Corresponding Occurrence Probabilities

SPI interval	SPI classes	Occurrence probability (%)
More than 2.00	EW (Extreme wet)	2.3
1.99 to 1.50	SW (Severe wet)	4.4
1.49 to 1.00	MW (Moderate wet)	9.2
0.99 to -0.99	N (Normal)	68.2
-1.00 to -1.49	MD (Moderate drought)	9.2
-1.50 to -1.99	SD (Severe drought)	4.4
Less than -2.00	ED (Extreme drought)	2.3

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 척도모수(scale parameter),  $\beta$ 는 형상모수(shape parameter),  $\Gamma(\beta)$ 는 감마함수(Gamma function)이다.

## 2.2 베이저안 네트워크 이론 및 적용

베이저안 네트워크(Bayesian Network (BN)) 기법은 자연재해와 같이 불확실성이 큰 여러 가지 원인들로부터 발생하는 복합적인 자연현상에 대하여 취약성 및 위험도를 지속적으로 평가하는데 유리하다. 즉 위험요소들의 분류와 규명, 위험요소들 간의 인과관계, 위험요소들의 발생확률 산정 등을 통해 각각 위험요소의 발생경로와 발생확률 등을 체계적으로 추정 할 수 있어 최근 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 기상학적 가뭄특성을 해석하기 위한 목적으로 PN과 다양한 시간단위의 SPI 간의 상호관계를 규명하기 위해 BN 모형을 구축하였다.

Fig. 1은 BN의 기본 개념을 나타내며, 총 3개의 확률변수  $X_1, X_2, X_3$ 의 관계를 네트워크로 표현한 것이다.  $X_1$ 는 독립변수이고,  $X_2$ 와  $X_3$ 에게 직접적인 영향을 준다. 그래프에서 노드는 변수를, 화살표는 변수 쌍 사이의 종속관계를 보여준다. 따라서  $X_1$ 는  $X_2$ 와  $X_3$ 의 부모 노드(parent node)이며,  $X_2$ 와  $X_3$ 는  $X_1$ 의 자식 노드(child node)가 되어 각 노드간의 확률적 관련성을 표현할 수 있다.

일반적으로 베이저안 네트워크는 수학적 확률 이론과 그래프 이론의 결합으로 이루어진 그래픽 모델로 구성 요소들 간의 의존적인 관계를 확률적 이론에 기반을 두어 표현할 수 있다. 즉, 복잡한 시스템을 간단한 모델로 구성하고, 새로운 정보가 입력되면 미리 입력된 정보의 조합을 통해 확률적 추론을 가능하게 한다. 각 변수는 베이저안 네트워크에서 노드로 표현되며, 변수들 간에 존재하는 확률적 의존 관계의 방향을 호(Arc)로 나타낸다. 이러한 베이저안 네트워크는 조건부 확률을 계산함에 있어 베이즈 정리를 이용하며, 화살표로 연결된 노드들과는 서로 의존적으로 자식이 아닌 노드들과는 조건부 독립적이라는 속성을 갖고 있다. 각각 노드의 확률변수를  $x$ 라 하고, 부모 노드의 상태를  $\pi$ 라 하면, 각 노드의 조건부 확률표의 값은 Eq. (3)을 통해 얻을 수 있다.

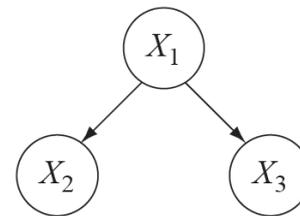


Fig. 1. Example of a Bayesian Network

$$P(x) = \sum_i P(x | \pi_i) P(\pi_i) \quad (3)$$

여기서,  $i$ 는 부모 노드의 상태 수를 나타낸다.

또한, 변수의 개수가 증가할 경우에는 위와 같은 식으로 각 노드의 확률값을 계산하는 데 한계가 있으며, 이러한 경우에는 모든 노드의 결합확률분포를 사용하는 연쇄법칙(chain rule)을 이용한다. 이를 일반화하면 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | Parents(x_i)) \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 전체 노드의 수를 의미한다. 이처럼 연쇄법칙을 이용하여 얻은 결합확률과 데이터를 수집하여 얻은 조건부 확률을 통해 사후확률(posterior probability)을 추론할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 시간단위를 고려한 일단위 SPI와 PN 자료를 기반으로 하여 기상학적 가뭄의 특성을 분석하기 위한 베이지안 네트워크 모형을 구축하였다. 본 연구에서 수행한 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 우리나라 과거 가뭄기록 중 기상관측 시작 이래 최소수준의 강수량 발생으로 인해 서울과 원도지역에 최악의 가뭄이 발생한 바 있다(MLIT, 2002). 이에 본 연구는 서울과 원도 관측소를 연구대상으로 선정하고, 각 관측소별 일강우량을 이용하여 PN 및 30일, 60일, 90일 시간단위의 SPI (SPI30, SPI60, SPI90)를 산정한 후, 베이지안 네트워크 모형의 분석자료를 구축하였다.

2) 구축한 자료를 이용하여 각 노드별 사전분포를 부여하고, PN의 절단수준(threshold value) 변화에 따른 일단위 SPI (SPI30, SPI60, SPI90)의 민감도 분석을 수행하였다. 이는 PN의 절단수준

변화에 따른 일단위 SPI의 사후분포를 추정한 것이다.

3) 마지막으로 다양한 시간단위별 SPI 간의 상호 연관성을 확률론적으로 해석하였다. 즉, 기상학적 가뭄을 판단함에 있어 다양한 시간단위별 SPI를 복합적으로 활용할 수 있는 방안을 제안하기 위하여 베이지안 네트워크 기법의 활용성을 검토하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 베이지안 네트워크 기반의 기상학적 가뭄해석 모형 구축

본 연구에서는 서울관측소와 원도관측소의 일강수량 자료를 대상으로 모형을 적용시켰다. 분석기간은 1974년부터 2013년까지 40년간의 일단위 PN과 SPI를 대상으로 하였다. 이를 바탕으로 가뭄지수 간에 존재하는 확률적 인과관계 또는 상호의존성을 나타낼 수 있는 네트워크 모형을 구축하기 위하여 베이지안 네트워크(BN)를 위한 소프트웨어인 네티카(Netica)를 활용하였다. Fig. 2는 서울관측소와 원도관측소의 BN 모형을 나타내고 있다. 여기서 상위노드는 여러 가지 시간단위별 SPI를 산정하는 데 공통적으로 영향을 미치는 변수인 PN으로 설정하였으며, 나머지 변수들 간에 존재하는 확률적 의존 관계의 방향은 화살표로 연결하였다.

여기서 각 노드의 등급은 앞 절에서 제시한 바와 같이 PN은 6개 등급으로 SPI는 7개 등급으로 구분되었다. 이 중 PN의 F등급과 SPI의 4개 등급(N, MW, SW, EW)은 모두 정상 이상의 상태로 가뭄이 아닌(non-drought) 상태 또는 습윤상태(wet)를 의미하며, 나머지 PN의 5개 등급(A, B, C, D, E)과 SPI의 3개 등급(MD, SD, ED)는 정상 미만의 상태로 가뭄상태(drought)를 나타낸다. 또한, 이처럼 구축된 BN 모형은 노드별 사전확률과 화살표를 연결

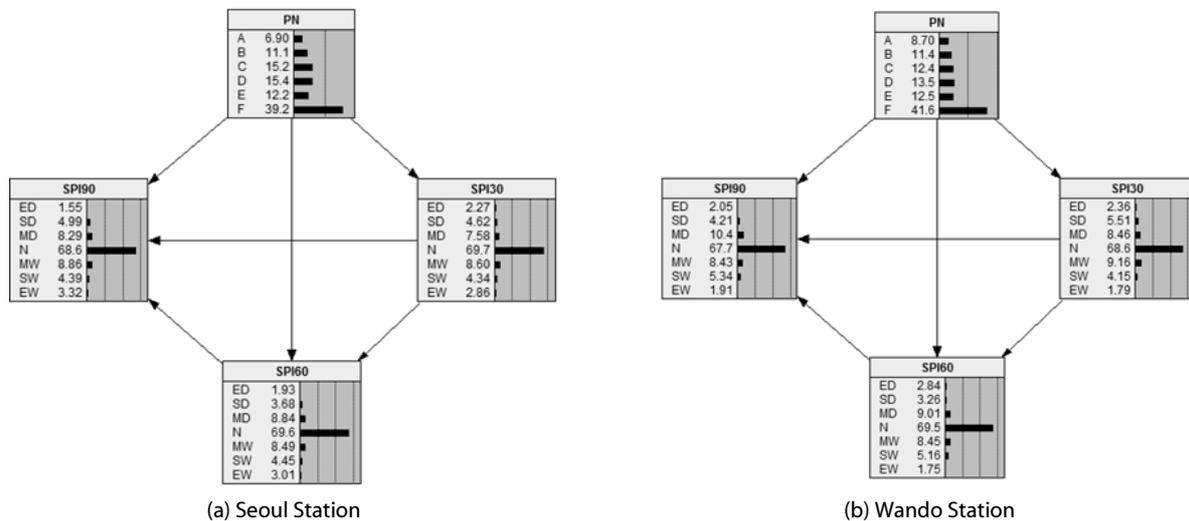


Fig. 2. Prior Probability for Bayesian Network Model at Seoul(a) and Wando(b) Station

하기 위한 속성자료인 조건부 확률을 이용하여, 한 개체의 다른 속성들의 값이 주어졌을 때, 분류 클래스 노드의 사후확률분포를 추정할 수 있게 된다. 즉, BN 모형 내 각 노드의 사후확률의 변화를 확인하여, 특정 설명변수가 복잡한 인과관계를 통하여 종속변수에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 민감도 분석이 가능하다.

### 3.2 PN의 절단수준에 따른 SPI의 민감도 분석

앞 절에서 구축한 서울관측소와 완도관측소의 BN 모형에서 상위노드인 PN의 절단수준 변화에 따른 SPI의 사후확률분포의 변화와 복잡한 인과관계를 해석하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 3은 PN의 절단수준을 A등급으로 설정하여 극한 강수부족

의 상태를 가정하고, PN이 20% 미만인 경우에 따른 SPI의 등급 내 발생확률 변화를 검토하였다. 그 결과, 서울관측소에서는 기본 BN 모형에서의 SPIs (SPI30, SPI60, SPI90)의 가뭄(Drought) 발생확률(SPI30 = MD+SD+ED = 14.47%, SPI60 = MD+SD+ED = 14.45%, SPI90 = MD+SD+ED = 14.83%)과 비교하여 상대적으로 큰 증가폭을 보이는 것으로 확인되었다. PN의 절단수준을 A등급인 경우의 SPIs의 가뭄발생확률은 SPI30 (MD+SD+ED = 96.6%), SPI60 (MD+SD+ED = 52.7%), SPI90 (MD+SD+ED = 39.0%)이며, 이 때 PN에 큰 민감도를 보이는 SPI는 SPI30, SPI60, SPI90의 순으로 나타나는 것으로 확인되었다.

이와 동일한 방법으로 서울과 완도관측소에 대해, PN의 절단수

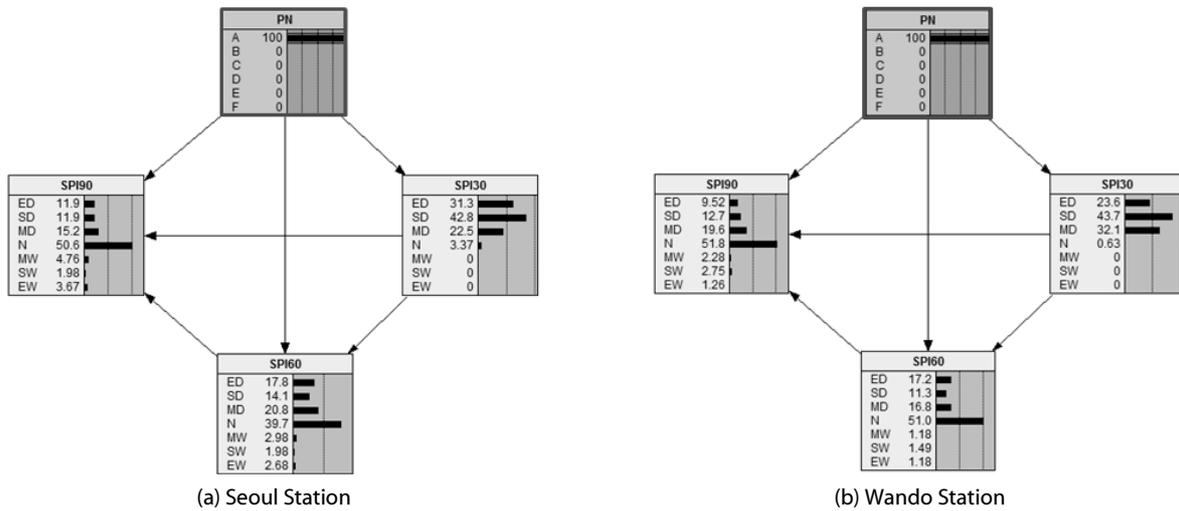


Fig. 3. Sensitivity Analysis of PN-SPIs According to Threshold (PN=20%) for Bayesian Network Model

Table 2. For Season Classification(Winter-Spring and Summer-Autumn), the Probability of Drought Occurrence According to Threshold of PN(%)

Station	Threshold of PN(%)	Total (January to December)			Winter to Spring (December to May)			Summer to Autumn (June to November)		
		SPI30	SPI60	SPI90	SPI30	SPI60	SPI90	SPI30	SPI60	SPI90
Seoul	20	96.63	52.70	39.00	95.80	52.30	39.40	98.20	53.20	38.40
	40	76.80	46.80	38.11	76.00	47.70	38.13	77.90	46.30	38.06
	60	53.90	39.99	34.17	52.23	39.75	33.76	56.00	40.41	34.44
	80	40.76	32.84	29.76	39.41	32.52	29.98	42.20	33.33	29.42
	100	32.65	26.92	25.27	31.67	26.58	25.59	33.77	27.43	24.97
	<b>Prior prob.</b>	<b>(14.47)</b>	<b>(14.45)</b>	<b>(14.83)</b>	<b>(15.03)</b>	<b>(14.57)</b>	<b>(15.05)</b>	<b>(13.92)</b>	<b>(14.32)</b>	<b>(14.62)</b>
Wando	20	99.37	45.30	41.82	100.00	45.80	43.40	98.80	44.52	40.28
	40	77.00	45.50	43.50	79.30	48.40	44.50	75.30	43.08	42.41
	60	54.44	38.84	38.16	57.50	39.10	38.12	51.64	38.77	38.24
	80	41.17	33.26	33.26	43.56	33.20	32.73	39.11	33.42	33.83
	100	33.06	27.39	28.48	34.93	27.19	27.98	31.49	27.79	29.00
	<b>Prior prob.</b>	<b>(16.33)</b>	<b>(15.11)</b>	<b>(16.77)</b>	<b>(16.44)</b>	<b>(13.99)</b>	<b>(15.41)</b>	<b>(16.24)</b>	<b>(16.18)</b>	<b>(17.89)</b>

Table 3. For Classification of Before and Since 2000, the Probability of Drought Occurrence According to Threshold of PN(%)

Station	Threshold of PN(%)	Total (1974 to 2013)			Before 2000 (1974 to 1999)			Since 2000 (2000 to 2013)		
		SPI30	SPI60	SPI90	SPI30	SPI60	SPI90	SPI30	SPI60	SPI90
Seoul	20	96.63	52.70	39.00	95.50	54.60	47.70	98.40	49.70	24.70
	40	76.80	46.80	38.11	75.30	48.94	45.56	76.60	43.00	24.92
	60	53.90	39.99	34.17	53.30	42.20	39.74	55.10	35.70	24.05
	80	40.76	32.84	29.76	40.33	34.07	33.62	41.60	30.76	22.71
	100	32.65	26.92	25.27	32.27	27.94	28.39	33.35	25.13	19.67
	<b>Prior prob.</b>	<b>(14.47)</b>	<b>(14.45)</b>	<b>(14.83)</b>	<b>(14.28)</b>	<b>(15.10)</b>	<b>(16.50)</b>	<b>(14.83)</b>	<b>(13.22)</b>	<b>(11.74)</b>
Wando	20	99.37	45.30	41.82	99.10	48.00	44.40	100.00	36.67	34.53
	40	77.00	45.50	43.50	77.90	48.80	46.88	75.30	37.09	35.29
	60	54.44	38.84	38.16	55.01	42.50	42.16	53.18	30.35	29.48
	80	41.17	33.26	33.26	41.59	35.83	36.52	40.38	27.31	26.23
	100	33.06	27.39	28.48	33.31	29.54	31.14	32.46	22.49	22.80
	<b>Prior prob.</b>	<b>(16.33)</b>	<b>(15.11)</b>	<b>(16.77)</b>	<b>(18.04)</b>	<b>(17.27)</b>	<b>(19.09)</b>	<b>(13.17)</b>	<b>(11.08)</b>	<b>(12.19)</b>

준을 변화하여 20% 미만, 40% 미만, 60% 미만, 80% 미만, 100% 미만으로 경우로 가정하여 PN-SPIs 간의 민감도를 모두 검토하였다. 또한 우리나라의 계절적 특성을 고려하여 겨울에서 봄 기간의 가뭄과 여름에서 가을 기간의 가뭄에 대한 특성을 추가적으로 구분한 후, PN의 절단수준 변화에 따른 PN-SPIs 간의 민감도 해석 결과를 Table 2와 같이 제시하였다.

그 결과, 서울관측소와 완도관측소에서 PN의 절단수준 변화에 따른 SPI의 민감도는 SPI30, SPI60, SPI90의 순서로 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 또한, 우리나라의 계절적 특성을 고려하여 가뭄을 구분하였을 경우, 서울관측소에서는 겨울-봄 기간의 SPI90는 SPI30과 SPI60에 비하여 상대적으로 큰 가뭄확률을 나타내며, 여름-가을 기간의 SPI30과 SPI60은 SPI90에 비하여 상대적으로 큰 가뭄확률을 나타냈다. 완도관측소에서 PN이 20% 미만일 경우와 40% 미만일 경우(평년대비 강수량이 크게 부족한 경우를 가정한 경우), 겨울-봄 기간의 가뭄은 여름-가을 기간의 가뭄에 비하여 큰 가뭄확률을 나타냈다. 이는 평년대비 강수량이 크게 부족할 경우에는 겨울과 봄기간의 가뭄은 여름과 가을기간의 가뭄에 비해 민감하게 반응한다는 의미로 해석된다.

Table 3은 위와 동일하게 PN의 절단수준을 변화에 따른 PN-SPIs 간의 민감도를 검토하는 데 있어, 2000년을 기준으로 전·후의 시기에 대한 기상학적 가뭄의 발생특성을 해석한 결과이다. 서울관측소와 완도관측소의 2000년 이전의 기간(1974~1999)에는 2000년 이후의 기간(2000~2013)에 비하여 SPI60과 SPI90가 SPI30에 비해 큰 가뭄 발생확률을 나타냈다. 반면, 서울관측소는 2000년 이후의 기간(2000~2013)에서 SPI30이 SPI60 및 SPI90과 비교하여 상대적으로 큰 가뭄 발생확률이 나타났고, 완도관측소는 2000년 이전의 기간(1974~1999)에서 SPI30이 SPI60 및 SPI90과 비교하

여 상대적으로 큰 가뭄 발생확률을 나타냈다. 이는 2000년을 기준으로 전·후의 시기에 대하여 PN-SPI60과 PN-SPI90 간의 민감도 특성이 서울과 완도 관측소는 서로 유사하나, PN-SPI30 간의 민감도 특성은 관측소별로 다른 패턴이 나타남을 의미한다.

### 3.3 다양한 시간단위별 SPIs의 확률론적 연관성 분석

실제 다양한 지속시간으로부터 계산된 SPI를 이용하여 가뭄을 판단할 경우, 서로 다른 시간 척도를 가진 SPI 사이에 종종 일관성이 없는 결과로 인해 가뭄을 판단함에 있어서 혼란을 야기하지만, 현재에도 이러한 한계를 극복하지 못한 채 가뭄판단 시 SPI는 선택적으로 사용되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기상학적 가뭄 해석을 위해 SPI를 사용하는 데 있어, 하나의 시간단위 SPI를 무조건적으로 선택하기에 앞서 다양한 시간단위별 SPI 간의 확률론적 연관성을 우선적으로 분석하기 위하여 베이지안 네트워크 모형을 구축하였다.

앞 절에서 구축한 서울관측소와 완도관측소의 BN 모형은 다양한 시간단위별 SPI와 PN의 변수 간에 존재하는 확률적 인과관계 또는 상호의존성을 나타낼 수 있다. Fig. 4는 완도 관측소에서의 SPI60의 가뭄등급 변화에 따라 SPI30과 SPI90의 사후확률이 변화하는 과정을 도시하였다.

Fig. 4(a)는 기존의 BN 모형의 사전확률을 나타내며, Fig. 4(b)는 Simulation #1로서 기존의 BN 모형에서 SPI60의 가뭄등급이 보통 가뭄(MD)인 경우에 대한 SPI30과 SPI90의 사후확률을 나타낸다. Fig. 4(c)는 Simulation #2로서 기존의 BN 모형에서 SPI60이 심한 가뭄(SD)인 경우에 대한 SPI30과 SPI90의 사후확률, Fig. 4(d)는 Simulation #3으로서 기존의 BN 모형에서 SPI60이 극심한 가뭄(SD)인 경우에 대한 SPI30과 SPI90의 사후확률을

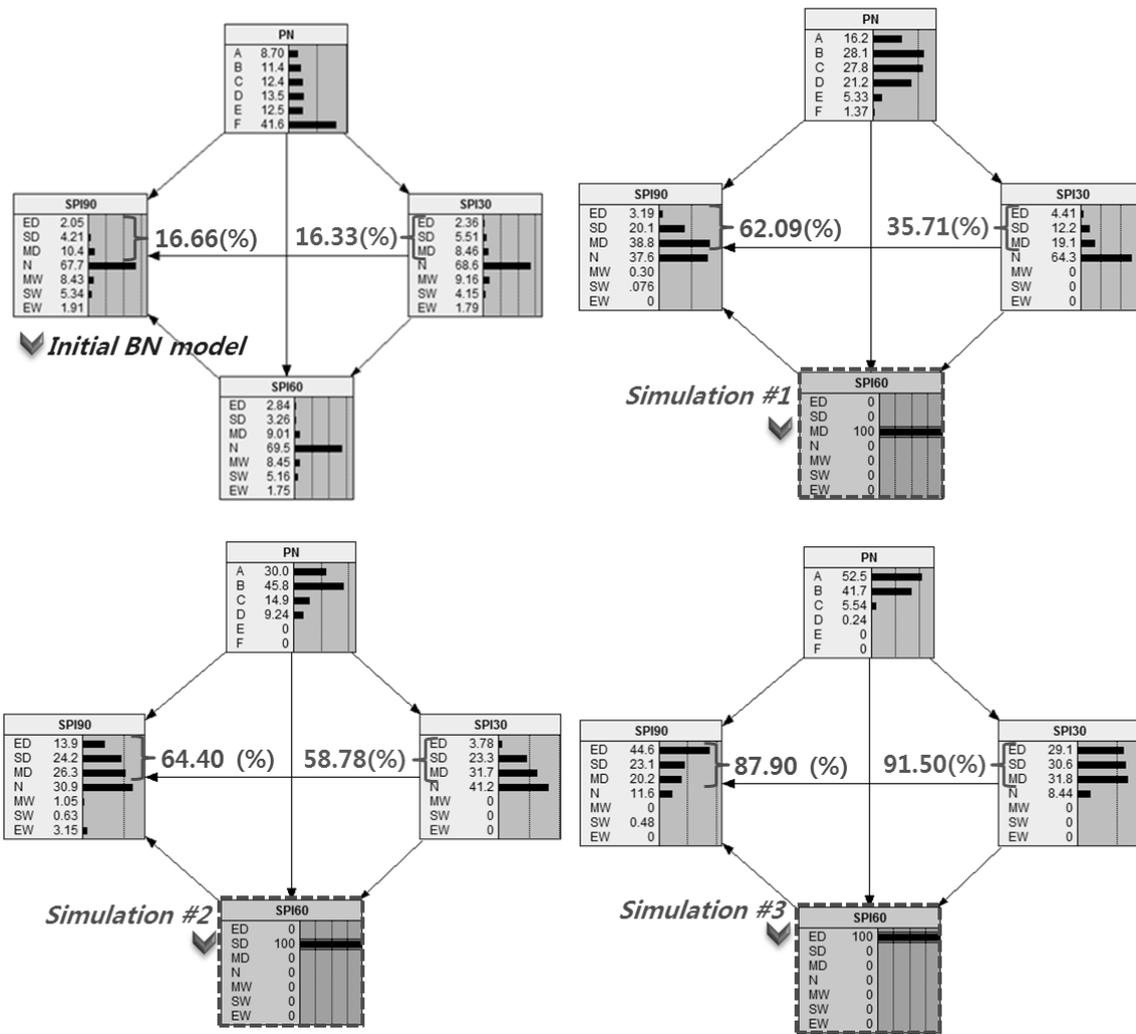


Fig. 4. Sensitivity Analysis of SPI60-SPI30-SPI90 for BN Model at Wando Station

나타낸다. 여기서 그림 내 정상 미만의 상태로 가뭄(Drought)인 경우에 대한 누기확률을 검토한 결과, SPI60이 보통 가뭄(MD)에서 극심한 가뭄(SD)로 진행되는 순으로 가뭄발생확률이 큰 폭으로 증가하는 것이 확인된다.

특히, Simulation #1에서는 SPI60가 보통 가뭄(MD)로 가정됨에 따라 SPI30(16.33%→35.71%)에 비해 상대적으로 SPI90(16.66%→62.09%)의 사후확률이 크게 증가하였다. Simulation #2에서는 SPI60가 심한 가뭄(SD)로 가정됨에 따라 SPI30(16.33%→58.78%)에 비하여 SPI90(16.66%→64.40%)의 사후확률은 상대적으로 큰 증가폭을 보였다. 그러나 SPI60의 등급 변화에 따른 SPI90의 민감도는 Simulation #1과 Simulation #2의 차이가 크지 않다. 즉 SPI60이 보통 가뭄(MD) 이상의 가뭄등급(SD 포함)인 경우에는 SPI90의 가뭄발생 사후확률이 매우 커지는 것으로 해석된다. Simulation #3에서는 SPI60가 극심한 가뭄(SD)로 가정

됨에 따라 SPI30(16.33%→91.50%)의 사후확률이 SPI90(16.66%→87.90%)에 비해 크게 증가하였다. 또한, SPI60의 등급 변화에 따른 SPI30의 민감도는 Simulation #2에 비해 Simulation #3에서 크게 나타나는 것으로 확인되었다. Table 4는 위와 동일한 방법으로 서울 및 완도관측소에 대하여 SPI30의 가뭄등급 변화에 따른 SPI60, SPI90의 가뭄발생 사후확률 및 SPI90의 가뭄등급 변화에 따른 SPI30, SPI60의 가뭄발생 사후확률을 나타냈다.

Table 4에서 서울관측소와 완도관측소는 SPI30의 가뭄등급이 변화함에 따라, SPI90 보다는 SPI60의 가뭄발생 사후확률이 더 크게 나타났으며, 즉 SPI30-SPI60 간의 상호관계가 더 민감하게 작용하는 것으로 확인된다. SPI90의 가뭄등급이 변화함에 따라 SPI30보다는 SPI60의 가뭄발생 사후확률이 더 크게 나타났으며, 즉 SPI90-SPI60 간의 상호관계가 더 민감하게 반응하는 것으로 확인된다. 또한, 서울관측소에는 SPI60이 보통 가뭄(MD)과 심한

**Table 4.** The Posterior Probability of Drought Occurrence by Changing Drought Class for SPIs

Station	classes	SPI30		SPI60		SPI90	
		SPI60	SPI90	SPI30	SPI90	SPI30	SPI60
Seoul	MD	42.88	36.78	39.84	58.12	31.78	45.02
	SD	50.10	38.49	48.96	63.80	43.84	74.79
	ED	68.30	56.20	92.50	79.10	65.10	99.60
	<b>Prior prob.</b>	<b>(14.45)</b>	<b>(14.83)</b>	<b>(14.47)</b>	<b>(14.83)</b>	<b>(14.47)</b>	<b>(14.45)</b>
Wando	MD	43.20	42.25	35.71	62.09	32.39	47.37
	SD	49.50	45.10	58.78	64.40	56.60	77.30
	ED	57.12	54.50	91.50	87.90	78.00	97.70
	<b>Prior prob.</b>	<b>(15.11)</b>	<b>(16.66)</b>	<b>(16.33)</b>	<b>(16.66)</b>	<b>(16.33)</b>	<b>(15.11)</b>

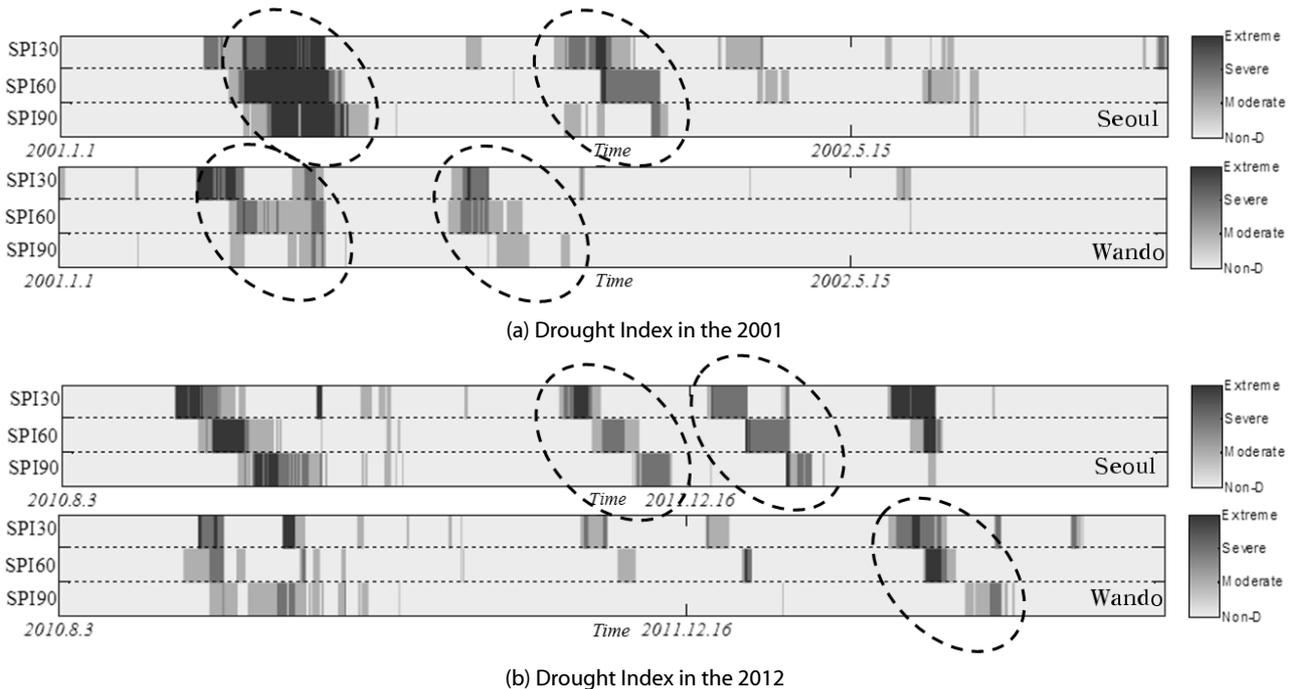
가뭄(SD)인 경우에는 SPI90의 가뭄발생 사후확률이 SPI30에 비해서 매우 커지는 것으로 확인되지만, SPI60이 가장 극한 가뭄(ED)인 경우에는 SPI60-SPI30 간의 상호관계가 더 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다.

**3.4 과거 2000년대 가뭄기록을 기반으로 한 SPI90의 가뭄 전조정보 활용성 검토**

일반적으로 단기가뭄을 판단하는 데 있어 3개월 누적강수현황을 고려한 SPI90은 다양한 시간단위의 표준강수지수 중 가장 활발히 사용되고 있다. 앞 절의 다양한 가뭄지수간의 민감도 해석결과에

따르면 SPI90은 SPI60와의 상호의존성이 컸으며, SPI60이 극한 가뭄(ED)인 경우에는 SPI30 간의 상호관계가 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 즉, 3개월의 누적강수현황에 따른 가뭄지수를 기반으로 단기가뭄을 판단함에 있어, 가뭄 전조정보로서 가뭄발생하기 이전의 가뭄상태를 설명하는 데 있어 SPI60과 SPI30의 활용 가능성을 검토하였다. 2000년대 우리나라의 대표적인 가뭄발생 기간(2001년, 2008~2009년, 2012년) 중 2008~2009년의 가뭄은 경남, 전남, 강원도 동해 지역을 비롯하여 특히 강원도 태백사에서 큰 피해를 주었다. 반면 2001년과 2012년에는 본 연구의 대상지점인 서울관측소와 완도관측소에서도 가뭄으로 인한 피해가 발생하였으므로, 해당시기 전·후의 가뭄상태를 검토하였다.

지난 2001년 3월부터 6월까지의 강원·충북·경기북부 등 중부지방과 서남부해안지역을 중심으로 극심했던 봄 가뭄은 이 기간 중 강수량이 예년평균의 10~30%에 불과할 정도로, 1904년 기상관측 이래 최악의 봄 가뭄으로 기록된바 있다(MLIT, 2002). 이때 서울관측소와 완도관측소의 2001년 가뭄기간의 전·후 시점에 대한 가뭄등급은 Fig. 5(a)와 같다. Fig. 5(a)의 상단그림은 서울관측소의 가뭄등급이며, Fig. 5(a)의 하단그림은 완도관측소의 가뭄등급을 나타내고, 여기서 SPI30, SPI60, SPI90은 총 4개의 등급으로 가뭄이 아닌 경우(Non\_D)와 3개의 가뭄등급(Moderate, Severe, Extreme)으로 구분되었다. 실제 2001년 봄가뭄의 경우 SPI30, SPI60, SPI90)별 가뭄을 감지하는 촉발시점을 확인해 보면, 대체로 SPI30은 3월말에서 4월 초경에 가장 먼저 가뭄을 감지하고 난



**Fig. 5.** SPI30-SPI60-SPI90 at Seoul and Wando Station for Historical Drought Since 2000

후, SPI60과 SPI90의 순서로 가뭄을 확인하는 것을 알 수 있다.

실제 2012년의 가뭄은 2012년 6월 전국 강수량은 80mm로 평년(171mm)의 47%에 불과할 정도로 비가 적었으며, 경기 69%, 강원 55%, 충북 55%, 충남 52%, 전북 44%, 전남 28%, 경북 54%, 경남 35% 등 전국적으로 비가 적게 내려 심각한 충남지역에서 전북, 전남으로 가뭄이 확대되었다(KRC, 2012). 이 때 서울관측소와 완도관측소의 2012년 가뭄기간의 잔후 시점에 대한 가뭄등급은 Fig. 5(b)와 같다. 2012년 전·후 시점에서도 가뭄을 감지하는 촉발시점은 SPI30, SPI60, SPI90의 순서로 가뭄을 확인하였으며, 반면 SPI30과 SPI60에서는 가뭄을 감지하였음에도 불구하고 SPI90으로 가뭄단계가 전이되지 않는 경우도 다소 있는 것으로 확인된다. 이처럼 베이저안 네트워크 모형을 기반으로 가뭄지수 간에 존재하는 확률론적 상호의존성을 검토를 기반으로 하여 기상학적 측면의 가뭄상황을 인지하는 시점을 판단한다면, 보다 효율적인 표준강수지수의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

기상학적 측면의 가뭄상황을 정확하게 판단하는 데 있어 가뭄과 연관된 여러 시간단위(지속기간)에 따른 가뭄지수 간에 존재하는 확률론적 상호의존성을 객관적으로 해석하지 못하는 한계점이 있다. 또한, 기상학적 측면에서 가뭄을 해석할 경우 가장 많이 활용되는 다양한 시간 척도에 따른 SPI는 실제 발생한 가뭄을 판단할 경우, 종종 일관성이 없는 결과를 제시하여 혼란을 야기시키기도 한다. 따라서 본 연구에서는 베이저안 네트워크 기법을 활용하여 기상학적 측면의 가뭄과 연관된 변수들인 PN과 다양한 시간단위별 계산된 SPI를 이용하여 각 변수 간의 복잡한 민감성을 검토한 후, 보다 효율적인 표준강수지수의 활용 방안을 제시하였다.

베이저안 네트워크 모형을 기반으로 한 기상학적 측면 가뭄특성의 확률론적 평가 결과에 대해 요약하면 다음과 같다.

- (1) 서울관측소와 완도관측소에서 PN의 절단수준 변화에 따라 SPI는 시간단위를 단기로 고려한 순서(30일, 60일, 90일)에 해당하는 SPI30, SPI60, SPI90의 순서로 큰 민감도를 보이는 것으로 확인되었다. 즉, 가뭄판단의 이해를 쉽게 하기 위한 목적으로 PN을 기반으로 기상학적 가뭄을 판단할 경우, 일반적인 가뭄연구에서 가장 활발히 사용되는 3개월 누적강수량 기반으로 계산되어진 SPI90-PN 사이에는 일관성 있는 가뭄 정보를 제시하지 못할 가능성이 있는 것으로 판단된다.
- (2) 본 연구에서는 다양한 시간단위별 SPI의 상호 연관성을 확률적으로 해석하고자 여러 시간단위(지속기간)에 따른 가뭄지수 간의 민감도를 검토하였다. 즉, 여러 시뮬레이션의 조건을 가정

한 후, 조건변화에 따른 베이저안 네트워크 모형의 사후분포를 검토하였다. 그 결과, 서울관측소와 완도관측소에서 SPI30은 SPI60과의 관계에서 가장 큰 민감도를 보였으며, SPI60은 보통 가뭄상태(MD등급)와 심한 가뭄상태(SD)인 경우에는 SPI90과의 민감도가 가장 크게 나타났으며, SPI60이 극한 가뭄상태(ED등급)인 경우에는 SPI30과의 민감도가 크게 나타났다. 또한, SPI90은 SPI60과의 관계에서 가장 큰 민감도를 보이는 것으로 확인된다. 이러한 결과는 일반적으로 단기가뭄을 판단하는 데 있어, 가장 활발히 사용되어 지고 있는 SPI90에 대한 신뢰성을 향상시키는 방안 중 하나로 활용될 수 있을 것이다. 다시 말해, SPI90과 SPI60 간의 상호의존성이 크다는 점을 고려한다면, 3개월의 누적강수현황에 따른 가뭄의 발생하기 이전의 가뭄상태를 설명하는 데 있어 SPI60의 값을 가뭄 전조정보 중 하나로서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 기초연구사업(2013 R1A1A2013160)과 국토교통부 물관리연구사업(14AWMP-B079364-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

- Bashari, H., Smith, C. and Bosch, O. J. H. (2009). "Developing decision support tools for rangeland management by combining state and transition models and Bayesian belief networks." *Agricultural Systems*, Vol. 99, No. 1, pp. 23-34.
- India Meteorological Department (2010). *District-wise drought climatology of the Southwest Monsoon Season over India based on Standardized Precipitation Index (SPI)*.
- Kao, S. C. and Govindaraju, R. S. (2008). "Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via plackett family of copulas." *Water Resour. Res.*, Vol. 44, W02415, doi:10.1029/2007WR006261.
- Kao, S. C. and Govindaraju, R. S. (2010). "A copula-based joint deficit index for droughts." *J. Hydrol.*, Vol. 380, pp. 121-134.
- Kim, H. M. and Jung, S. H. (2013). "Bayesian Network-based data analysis for diagnosing retinal disease." *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 269-280 (In Korean).
- Kim, J. Y. and Ahn, S. E. (2011). "Developing a Bayesian Network model for real-time project risk management." *IE Interfaces*, Vol. 24, No. 2, pp. 119-127 (In Korean).
- Kim, S. D., Ryu, J. S., Oh, K. R. and Jeong, S. M. (2012). "An application of copulas-based joint drought index for determining comprehensive drought conditions." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 1, pp. 223-230 (In Korean).
- Korea Rural Community Corporation (KRC) (2012). *A white paper of drought in 2012* (in Korean).

- Li, L., Wang, J. F., Leung, H. and Jiang, C. S. (2010). "Assessment of catastrophic risk using Bayesian network constructed from domain knowledge and spatial data." *Society for Risk Analysis*, Vol. 30, pp. 1157-1175.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society Anaheim, California*, pp. 179-184.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MLIT) (2002). *Drought records survey report in the 2001* (in Korean).
- Palmer, W. C. (1965). "Meteorological Drought." *U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Research Paper No. 45*, Washington, D.C.
- Peng, M. and Zhang, L. M. (2012) "Analysis of human risks duo to dam-break floods-part1: A New Model Based on Bayesian Networks." *Nat Hazards*, Vol. 64, pp. 903-933.
- Shafer, B. A. and Dezman, L. E. (1982). "Development of surface water supply index to asses the severity of drought condition in snowpack runoff areas." *Proc. Western Snow Conf.*, pp. 164-175.
- Sunwoo, W. Y (2012). *Evaluation of flood risk using Bayesian Networks*, Master's Thesis, Seoul National University.
- Willeke, G., Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. and Guttman, N. B. (1994). *The national drought atlas, Institute for Water Resources Report 94-NDS-4*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Yoo, J. Y., Song, H., Kim, T. W. and Ahn, J. H. (2013). "Evaluation of short-term drought using daily standardized precipitation index and ROC analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1851-1860 (In Korean).