



A study on PDSI improvement for drought monitoring: focused on the estimation method of potential evapotranspiration

Moon, Jang Won^{a*} · Kang, Jae Won^b · Cho, Young Hyun^c

^aKorea Institute of Civil Engineering and Building Technology

^bSURI Engineering & Consulting Co., Ltd.

^cHydrometeorological Cooperation Center, Korea Water Resources Corporation

Paper number: 17-068

Received: 22 August 2017; Revised: 19 October 2017 / 27 October 2017; Accepted: 27 October 2017

Abstract

In this study, the effects of potential evapotranspiration method on drought index results were evaluated using SC-PDSI. Monthly heat index method, Penman-Monteith method, and Hargreaves equation were used as potential evapotranspiration method. SC-PDSI was calculated using three potential evapotranspiration method at 56 stations and compared the results. As a result, it was confirmed that the results by Penman-Monteith method and Hargreaves equation showed similar SC-PDSI calculation results without much difference, and the result by monthly heat index method showed a relatively large difference. It was confirmed that the results of SC-PDSI and drought situation judgment for the period of spring and winter season showed a big difference by the month. In conclusion, when calculating PDSI in Korea, using Penman-Monteith method and Hargreaves equation will be able to express the drought situation well.

Keywords: SC-PDSI, Penman-Monteith method, Hargreaves equation, Monthly heat index method, Drought index

가뭄감시를 위한 파머가뭄지수 개선 방안 연구: 잠재증발산량 산정 방법을 중심으로

문장원^{a*} · 강재원^b · 조영현^c

^a한국건설기술연구원 수자원·하천연구소, ^b수리이엔씨 SI사업본부, ^c한국수자원공사 수문기상협력센터

요 지

본 연구에서는 SC-PDSI를 이용하여 잠재증발산량 산정 방법이 가뭄지수 산정 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 잠재증발산량 산정 방법으로 월열지수법, Penman-Monteith 방법, Hargreaves 공식 등 세 가지 방법을 이용하였으며, 기상청 56개 지점을 대상으로 세 가지 잠재증발산량 산정 방법에 따른 SC-PDSI를 산정하고 그 결과를 비교하였다. 분석 결과, Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 Hargreaves 공식에 의한 결과는 월별로 큰 차이 없이 유사한 가뭄지수 산정 결과를 나타내고 있음을 확인하였으며, 월열지수법에 의한 결과는 상대적으로 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 월별로는 봄철과 겨울철 기간에 대해 산정된 가뭄지수와 가뭄상황 판단 결과가 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 결론적으로 우리나라에서 PDSI를 산정하고자 할 경우에는 Penman-Monteith 방법이나 Hargreaves 공식을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

핵심용어: SC-PDSI, Penman-Monteith 방법, Hargreaves 공식, 월열지수법, 가뭄지수

1. 서 론

가뭄에 효과적으로 대응하기 위해서는 가뭄과 관련된 다양한 기상 및 수문인자들에 대한 지속적인 모니터링을 수행함

으로써 가뭄의 시작을 파악할 수 있는 체계를 갖추는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 가뭄에 대한 모니터링은 강수량 등 수문인자들에 대한 현황과 함께 여러 가지 가뭄지수를 이용하고 있으며, 국내외에서 개발된 대표적인 가뭄지수로는 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI; Palmer, 1965), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI;

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0591
E-mail: jwmoon@kict.re.kr (J. W. Moon)

Shafer and Dezman, 1982), 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI; McKee *et al.*, 1993), 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI; Lee *et al.*, 2006) 등이 있다. 이 중 PDSI는 강수량, 기온 등 기상인자와 분석 대상 지역의 유효토양수분량을 이용하여 산정되는 가뭄지수이며, 1965년 개발된 이후 현재까지 가뭄에 대한 모니터링을 위해 세계적으로 널리 이용되고 있다. 그러나 PDSI는 수분수지 모형의 단순화에 따른 문제점, 잠재증발산량 산정 방법의 문제점 등이 지적된 바 있으며(Alley, 1984; Karl and Knight, 1985), Willeke *et al.* (1994)은 극한가뭄의 발생 빈도가 비정상적으로 크게 나타나는 지역이 존재한다는 점을 지적하였다. 또한, Wells *et al.* (2004)은 PDSI가 지역적으로 일관된 기준 하에 산정되지 못하고 있음을 확인하였으며, 이러한 결과가 PDSI의 경험적인 상수 결정 시 지역 특성이 반영되지 못하기 때문임을 밝힌 바 있다. Wells *et al.* (2004)은 이러한 검토 결과를 바탕으로 PDSI의 경험적인 상수가 해당 지역의 특성을 바탕으로 자동적으로 산정될 수 있도록 방법을 수정한 SC-PDSI (Self-Calibrating PDSI)를 제안하였다.

이와 함께 기존 PDSI 산정 과정에서는 잠재증발산량 산정 방법으로 Thornthwaite (1948)에 의해 제안된 방법인 월열지수법(monthly heat index method)을 이용하고 있다. 그러나 월열지수법은 우리나라와 같이 동절기 기온이 0°C 이하로 내려가는 지역에서는 잠재증발산량이 산정되지 않으며, 월 단위(monthly)로 잠재증발산량을 계산하는 방법이므로 월 단위보다 짧은 주 단위(weekly) 등으로 지수를 산정하고 할 경우에는 적합하지 않은 방법이라 할 수 있다. 이론적인 방법에 의해 잠재증발산량을 산정할 수 있는 방법 중 가장 널리 이용되고 있는 방법은 Penman-Monteith 방법이며, 국제관개배수 위원회(International Commission on Irrigation and Drainage, ICID)와 국제연합식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)에서는 기상자료로부터 잠재증발산량을 산정하거나 다른 방법들을 평가하기 위한 기준 방법으로 Penman-Monteith 방법을 이용하도록 하고 있다(Hargreaves, 1994). 그러나 Penman-Monteith 방법을 적용함에 있어 가장 큰 단점은 기온, 풍속, 일조시간 등 상대적으로 많은 기상자료를 필요로 한다는 점이며, 이러한 기상자료가 동시에 관측되고 있는 기상관측소의 숫자는 전 세계적으로 매우 제한적이다(Droogers and Allen, 2002). 이에 다양한 조건에서 잠재증발산량을 산정하기 위한 최적의 방법을 찾기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔으며(Hargreaves and Samani, 1985; Smith *et al.*, 1991; Allen *et al.*, 1994; New *et al.*, 2002), Hargreaves and Samani (1985)는

최고 및 최저기온과 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation) 자료만을 이용하여 잠재증발산량을 산정할 수 있는 공식(Hargreaves 공식)을 개발하여 제시하였다. Hargreaves 공식은 지금까지 많은 국내외 연구자들에 의해 제한된 기상자료 조건 하에서 적용성이 충분히 있음이 확인되었다(Jensen *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1998; Temesgen *et al.*, 1999; Oh *et al.*, 2002; Hargreaves and Allen, 2003; Oh and Lee, 2004; Rim, 2008; Lee *et al.*, 2008; Lee and Park, 2008).

가뭄은 강수량 부족 등이 원인이 되어 발생하는 현상이므로 이를 정확하게 모니터링하기 위해서는 증발산과 같은 수분 손실이 제대로 반영된 가뭄지수 산정이 중요하다고 할 수 있다. 대표적인 가뭄지수인 PDSI 산정 방법론에 있어 잠재증발산량 산정 방법의 문제점을 제시한 연구는 있으나 이를 개선하기 위한 연구는 상대적으로 부족한 상황이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 PDSI 산정 과정에서 잠재증발산량 산정 방법이 미치는 영향을 검토하고 향후 우리나라에서 가뭄관리 및 모니터링에 PDSI를 활용할 경우 바람직한 적용 방법을 제시하고자 하였다. 분석을 위한 가뭄지수로는 Wells *et al.* (2004)에 의해 제시된 SC-PDSI를 이용하였으며, 잠재증발산량 산정 방법으로 월열지수법과 Hargreaves 공식, Penman-Monteith 방법 등 세 가지 방법을 적용하고 그 결과를 상호 비교·검토 하였다. 잠재증발산량 산정 방법으로 가장 정확도가 높은 것으로 알려져 있는 Penman-Monteith 방법을 이용한 SC-PDSI 산정 결과를 기준으로 월열지수법을 이용한 지수 산정 결과와 Hargreaves 공식을 이용한 지수 산정 결과를 비교하였다.

2. 배경이론

2.1 Self-Calibrating PDSI (SC-PDSI)

Wells *et al.* (2004)은 PDSI 산정 과정에서 경험적으로 결정되는 인자를 분석 대상 지역의 기후특성을 고려하여 자동적으로 산정될 수 있도록 방법을 수정한 SC-PDSI (Self-Calibrating PDSI)를 제안하였다. Wells *et al.* (2004)은 Palmer (1965)에 의해 제안된 방법을 이용할 경우 지역별로 일관된 결과를 얻을 수 없다는 사실을 인지하고 이러한 한계를 수정하고자 하였으며, 이를 위해 가뭄지수 산정 공식과 기후특성인자 산정 방법을 수정하여 제시하였다.

Palmer (1965)에 의해 제시된 PDSI에서는 최대 가뭄지속 기간에 대한 직선을 결정하고 이를 기반으로 유도된 가뭄지수 산정 공식을 가뭄기 및 습윤기에 관계없이 동일하게 적용하고

있다. 그러나 습윤기의 경우 가뭄기의 직선과는 다른 패턴을 나타낼 수 있으며, 이로 인해 습윤 상태에 대해 산정된 지수는 실제 상황과 다른 결과를 보일 수 있어 SC-PDSI에서는 가뭄기와 습윤기에 대한 산정 공식을 분리하여 유도하였다. 가뭄기 및 습윤기에 대한 지속기간(t)별 최대 수분편차지수 합 ($\sum Z$)의 분포를 적절히 표현할 수 있는 직선을 결정된 후 이를 이용하여 지속기간 인자를 산정하는 방법을 고려하였으며, 관련 관계식은 Eqs. (1) and (2)와 같다.

$$\sum Z = C(mt + b) \tag{1}$$

$$X_i = \left(1 - \frac{m}{m+b}\right) X_{i-1} + \frac{CZ_i}{m+b} \tag{2}$$

여기서, X_i 는 가뭄지수, m 은 가뭄기 및 습윤기에 대한 직선의 기울기와 관련된 계수이며, b 는 y 절편으로부터 산정되는 계수에 해당한다. C 는 가뭄기의 경우 -4.0, 습윤기는 +4.0의 값을 갖는다.

이와 함께 Wells et al. (2004)은 기존 PDSI의 기후특성인자 (K)를 산정하는 방법을 수정하였으며, 분석 대상 지역의 특성을 고려하여 지수 계산 과정에서 자동적으로 산정될 수 있도록 방법론을 개선하였다. 기존 PDSI의 기후특성인자 산정 관계식에서 분모 및 분자가 나타내는 의미가 각각 관측된 값과 이론적으로 기대되는 값이라는 점에 착안하여 Eq. (3)과 같은 기후특성인자 산정 관계식을 제안하였다. 이때 가뭄기와 습윤기에 대한 기후특성인자를 구분하여 고려하였으며, 이를 통해 산정된 기후특성인자를 고려함으로써 최종적으로 가뭄지수를 산정할 수 있다.

$$K = \begin{cases} K'(-4.00 / 2nd \text{ percentile}), & \text{if } d < 0 \\ K'(+4.00 / 98th \text{ percentile}), & \text{if } d \geq 0 \end{cases} \tag{3}$$

여기서, K' 은 기존 PDSI의 기후특성인자 산정 관계식과 동일한 관계식으로 구성되며, d 는 수분수지 분석을 통해 산정된 수분편차로 0보다 큰 경우는 습윤기, 작은 경우는 가뭄기에 해당한다.

2.2 월열지수법(monthly heat index method)

월열지수법은 월별 잠재증발산량을 산정하기 위해 사용되는 방법으로 Thornthwaite (1948)에 의해 제안된 방법이다. Thornthwaite (1948)는 북위 29~43° 사이의 미국 전역에 대해 증발산계 측정에 의해 자료를 수집한 후 기온 및 일조시간

과 잠재증발산량 사이의 관계를 광범위하게 연구하였으며, 그 결과를 분석하여 Eq. (4)와 같은 경험적인 잠재증발산량 산정 공식을 제안하였다.

$$PE_n = 1.6 L_d \left(\frac{10t_n}{J} \right)^a \tag{4}$$

여기서, PE_n 은 월 단위 잠재증발산량($cm/month$)이며, L_d 는 위도에 따른 일조시간 조정계수, t_n 은 월평균기온($^{\circ}C$), J 는 연열지수(yearly heat index)로 Eq. (5)를 이용하여 산정되고 a 는 Eq. (6)의 관계를 통해 산정되는 계수이다.

$$J = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{t_n}{5} \right)^{1.514} \tag{5}$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7}) J^3 - (7.71 \times 10^{-5}) J^2 + (1.79 \times 10^{-2}) J + 0.49 \tag{6}$$

월열지수법은 증발산량이 기온에 직접 비례한다는 점에 근거를 두고 있는 방법으로 실제 여러 가지 다양한 수문학적 인자들이 증발산에 영향을 미친다는 점에서 이론적인 약점이 없지 않으나 대체로 만족할만한 결과를 주는 것으로 알려져 있으며, 여러 가지 수자원 관련 계획 수립에 있어 잠재증발산량을 산정하기 위한 방법으로 이용되고 있다.

2.3 Hargreaves 공식

Hargreaves and Samani (1985)는 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation)과 최고 및 최저기온 자료만을 이용하여 잠재증발산량을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. Hargreaves et al. (1985)에 의하면 Hargreaves 공식은 별도의 검정과정 없이 전 세계적으로 이용될 수 있다고 언급하고 있으나 일부 연구자들에 의해 적용 대상 지역의 기후 조건을 고려하여 매개변수 지역화를 수행함으로써 보다 정확한 잠재증발산량 산정이 가능하다는 연구결과가 제시되었으며(Vanderlinden et al., 2004; Gavilan et al., 2006), 국내에서도 일부 연구자들에 의해 Hargreaves 공식의 매개변수 보정에 관한 연구가 이루어진 바 있다(Lee et al., 2008; Lee and Park, 2008; Moon et al., 2013). 이러한 연구 중 Moon et al. (2013)은 우리나라의 자료를 이용하여 태양복사열과 기온과의 관계를 분석한 후 수정 공식을 Eq. (7)과 같이 제안한 바 있다.

$$PE = K_{ET} \times RA \times (TC + 17.8) \times TD^{0.58} \tag{7}$$

여기서, K_{ET} 는 Hargreaves 공식의 매개변수로 알려져 있으며, RA 는 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation), TC 는 최고기온과 최저기온의 평균, TD 는 최고기온과 최저기온의 차이를 의미한다. Moon et al. (2013)은 기상청 71개 지점의 기상자료를 이용하여 분석을 수행한 후 지점별 K_{ET} 를 산정하여 제시하였으며, 본 연구에서는 기존 PDSI 산정 방법의 월열지수법을 대신하여 잠재증발산량을 산정하기 위한 방법 중 하나로 Moon et al. (2013)에 의해 제시된 수정 공식과 지점별 K_{ET} 산정 결과를 이용하였다.

2.4 Penman-Monteith 방법

Penman-Monteith 방법은 세계식량기구(FAO)에서 Penman FAO-24 방법을 개선하여 발표한 것으로 전 세계적으로 작물 필요수량에 대해 일관된 값을 제공할 뿐만 아니라 제한된 기상자료 하에서도 사용이 가능하므로 적용성이 뛰어나다고 알려져 있는 방법이다(Jung and Yoon, 2003). 과거 여러 가지 잠재증발산량 산정 방법에 대한 비교 검토에서도 Penman-Monteith 방법은 정확성과 적용성이 다른 방법들에 비해 월등히 뛰어난 것으로 나타나고 있으며, 세계식량기구(FAO), 미국토목학회(ASCE), 세계기상기구(WMO)에서도 이 방법을 적극 권장하고 있다. 이 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하기 위한 기본 관계식은 Eq. (8)과 같다.

$$PE = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (8)$$

여기서, R_n 은 순일사량($MJ/m^2/day$), U_2 는 지상 2m 높이에서 측정된 풍속(m/sec), Δ 는 포화증기압곡선 경사($kPa/^\circ C$), γ 는 건습구상수($kPa/^\circ C$), G 는 토양의 열유동량($MJ/m^2/day$)을 뜻한다.

본 연구에서는 기존 PDSI 산정 과정에서 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정한 후 그 결과를 바탕으로 SC-PDSI를 산정하였으며, 월열지수법 및 Hargreaves 공식에 의한 지수 산정 결과와 비교하였다.

3. 대상 지점 및 이용자료

PDSI 산정 과정에서 잠재증발산량 산정 방법의 영향을 검토하기 위해 본 연구에서는 기상청에서 운영 중인 관측지점을 대상으로 하였다. Moon and Lee (2012)는 서울 등 5개 지점

(서울, 부산, 대구, 인천, 목포)에 대한 PDSI 분석을 통해 가뭄 지수 산정 결과가 자료기간의 영향을 받고 있으며, 결과의 신뢰도 확보를 위해 최소 30년 이상의 관측자료를 이용할 필요가 있다는 연구결과를 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 기상청 지점별로 가용한 자료기간을 검토하여 30년 이상 자료가 축적되어 있는 지점을 대상 지점으로 선택하였으며, 그 결과 총 56개 지점이 연구 대상 지점으로 선정되었다. Fig. 1은 대상 지점의 공간적인 분포를 도시하여 나타난 것이다.

기상청 56개 지점을 대상으로 잠재증발산량 및 SC-PDSI 산정에 필요한 기상자료를 수집하였다. 56개 지점에 대해 기상청에서 제공하고 있는 자료를 이용하여 일 단위 강수량, 평균기온, 최고 및 최저기온, 풍속, 이슬점온도, 일조시간을 수집하였다. 자료의 수집 기간은 56개 지점을 동일한 기준으로 비교 검토할 수 있도록 1973년부터 2016년까지로 고려하였으며, 가뭄지수 산정 시 1973년부터 1975년까지 3년의 기간은 토양층 수분량에 대한 초기 값이 안정화되는 기간으로 고려하여 수분수지 분석은 수행하되 해당 기간 가뭄지수는 산정하지 않았다. 즉, 토양층 수분량의 초기 값이 가뭄지수 산정 결과에 영향을 주게 되므로 안정화된 이후의 수분수지 분석 결과를 이용하여 가뭄지수를 산정함으로써 이로 인한 영향을 최소화 할 수 있도록 고려하였다.

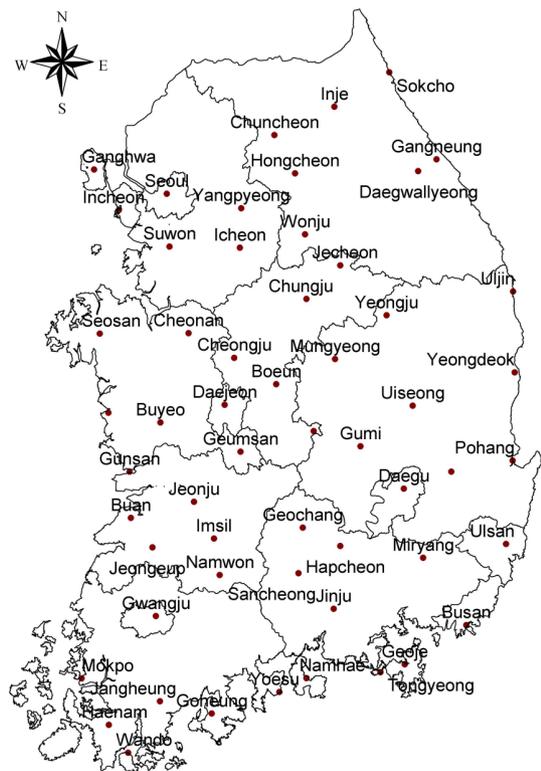


Fig. 1. Location Map of 56 Weather Stations

4. 연구방법

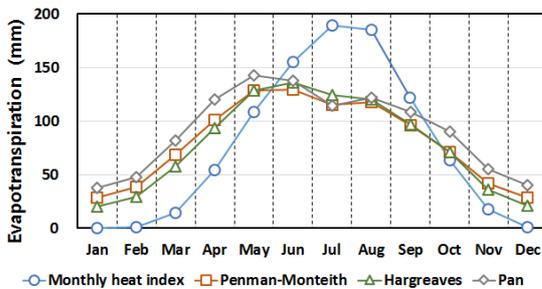
본 연구에서는 PDSI 산정 과정에서 고려되는 잠재증발산량 산정 방법의 영향에 대한 연구를 수행하였다. Palmer (1965)에 의해 제시된 PDSI에서는 월열지수법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하고 있으나 이 방법은 동절기 월 평균 기온이 0°C 이하로 떨어질 경우 잠재증발산량이 산정될 수 없는 한계를 지니고 있다. 우리나라의 기온 특성상 동절기 월 평균 기온이 0°C 이하로 하강하는 지점이 다수 나타나고 있으며, 이러한 지점에서 산정되는 동절기 잠재증발산량은 실제와 다른 양상으로 나타날 가능성이 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 먼저 잠재증발산량 산정 방법으로 가장 정확한 결과를 주는 것으로 알려져 있는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하고 월열지수법 및 Hargreaves 공식에 의해 산정된 결과와 비교하였다. 월별 잠재증발산량에 대한 비교를 통해 세 가지 잠재증발산량 산정 방법의 결과가 월별로 어떠한 차이를 보이는가를 파악하고자 하였다. 잠재증발산량에 대한 비교를 수행한 후 세 가지 방법의 잠재증발산량 산정 결과를 바탕으로 산정된 SC-PDSI를 비교하였다. 이때 잠재증발산량 산정 방법으로 Hargreaves 공식을 추가 고려한 이유는 기온 외에 풍속, 이슬점온도, 일조시간 등 계측자료가 충분치 않은 지역에서 PDSI를 산정하기 위한 대안으로서의 활용성 확인을 목적으로 한다.

5. 결과 분석

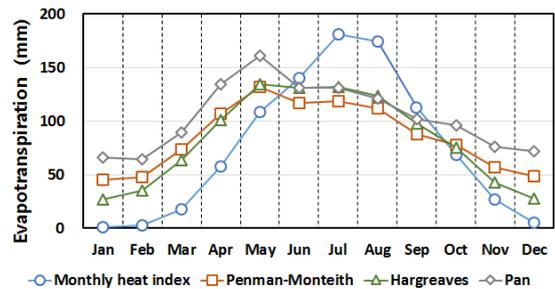
5.1 잠재증발산량 산정 및 비교

기상청 56개 지점에 대해 수집된 기상자료를 이용하여 월열지수법, Penman-Monteith 방법, Hargreaves 공식에 의한 잠재증발산량을 산정하였다. 월열지수법에 의해 산정되는 잠재증발산량이 월 단위인 관계로 지점별 월 잠재증발산량을 산정하여 비교하였으며, Fig. 2는 56개 지점 중 서울 등 8개 지점에 대해 산정된 월별 잠재증발산량을 도시하여 나타낸 것이다. 이때 실제 증발산의 월별 패턴을 비교하기 위해 기상청에서 제공하고 있는 지점별 증발량 월별 평년값을 함께 도시하여 나타냈으며, 이를 통해 실제 증발산 패턴과 세 가지 잠재증발산량 산정 방법에 따른 결과의 월별 패턴을 비교할 수 있다.

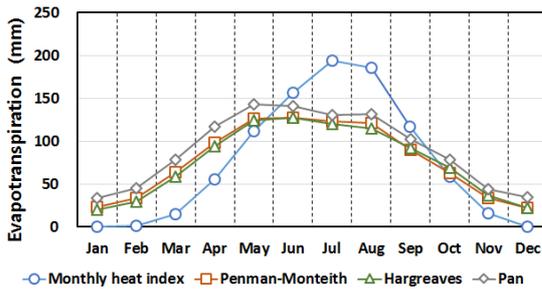
Fig. 2를 통해 기존 PDSI 산정 방법에서 이용하고 있는 월열지수법의 경우 실제 증발산 패턴과 다른 양상을 보이고 있음을 명확하게 확인할 수 있다. 그러나 Penman-Monteith 방법에 의해 산정된 잠재증발산량과 Hargreaves 공식을 이용하여 산정된 결과의 월별 패턴은 Pan 증발량의 월별 패턴과 매우 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 세부적으로 살펴보면, 월열지수법의 경우 1~5월, 10~12월의 기간에서 다른 두 가지 방법에 의해 산정된 잠재증발산량과 Pan 증발량보다 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 6월부터 9월까지의



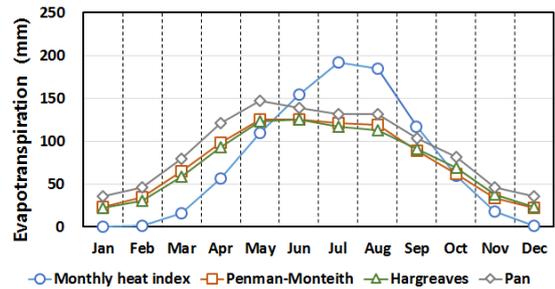
(a) Seoul



(b) Gangneung



(c) Cheongju



(d) Daejeon

Fig. 2. Comparison of monthly potential evapotranspiration results by three methods

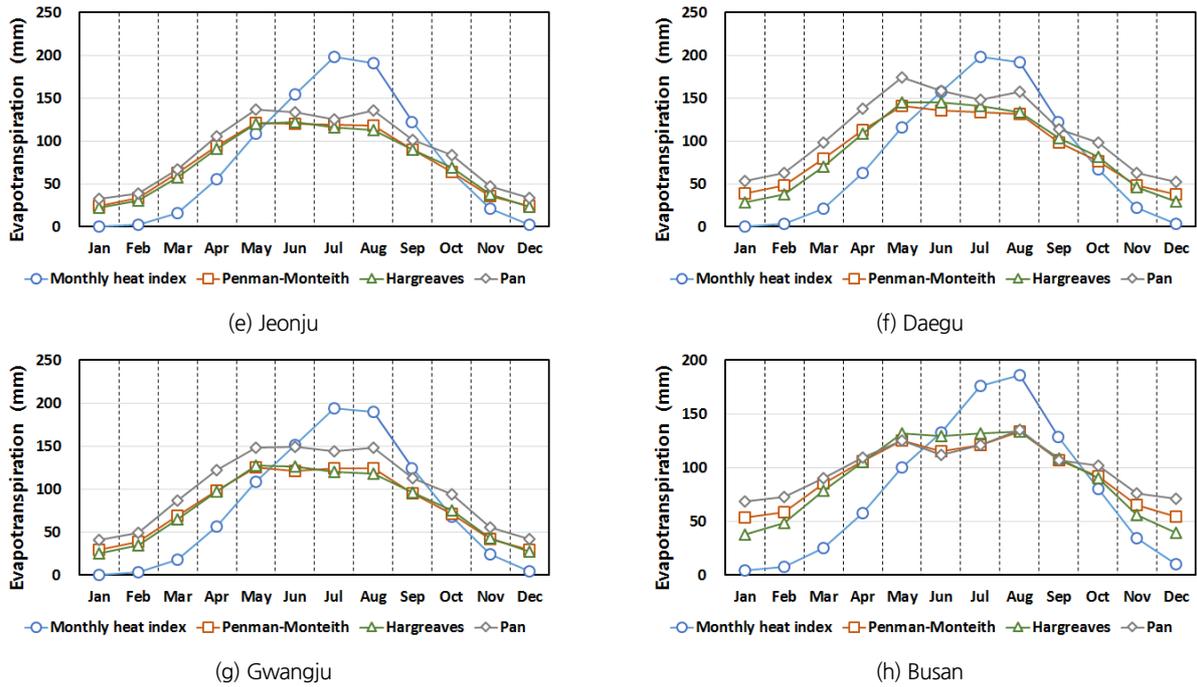


Fig. 2. Comparison of monthly potential evapotranspiration results by three methods (Continue)

기간에는 반대로 큰 값을 나타내고 있다. 특히 겨울철에 해당하는 1, 2월 및 12월에는 월열지수법에 의한 잠재증발산량이 0 또는 0에 가까운 값을 나타내고 있으며, 여름철에는 약 50 mm 이상 큰 잠재증발산량이 산정되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 월열지수법을 이용하여 가뭄지수를 산정할 경우 여름철과 겨울철에는 실제 수분수지 상황을 적절히 나타내기 어려울 수 있으며, 상대적으로 가뭄을 과소 또는 과대평가할 가능성이 있다고 판단할 수 있다. 따라서 보다 정확한 가뭄 모니터링을 수행하기 위해서는 기존 PDSI 산정 방법에서 잠재증발산량 산정 방법의 개선이 필요하며, 월열지수법 대신 Penman-Monteith 방법을 이용하거나 자료가 충분치 않을

경우 Hargreaves 공식을 이용함으로써 실제 가뭄상황에 대한 보다 정확한 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

5.2 지점별 SC-PDSI 산정 및 결과 분석

기상청 56개 지점에 대해 1976년부터 2016년까지 41개년에 대한 SC-PDSI를 산정하였다. 지점별 SC-PDSI는 잠재증발산량 산정 방법에 따라 기존 방법과 같이 월열지수법을 이용하여 산정한 결과(Original_SC-PDSI), Hargreaves 수정 공식을 이용하여 산정한 결과(Hargreaves_SC-PDSI), Penman-Monteith 방법을 이용한 결과(Penman-Monteith_SC-PDSI) 등 세 가지 경우를 고려하였다. Fig. 3은 56개 지점 중 속초 지점

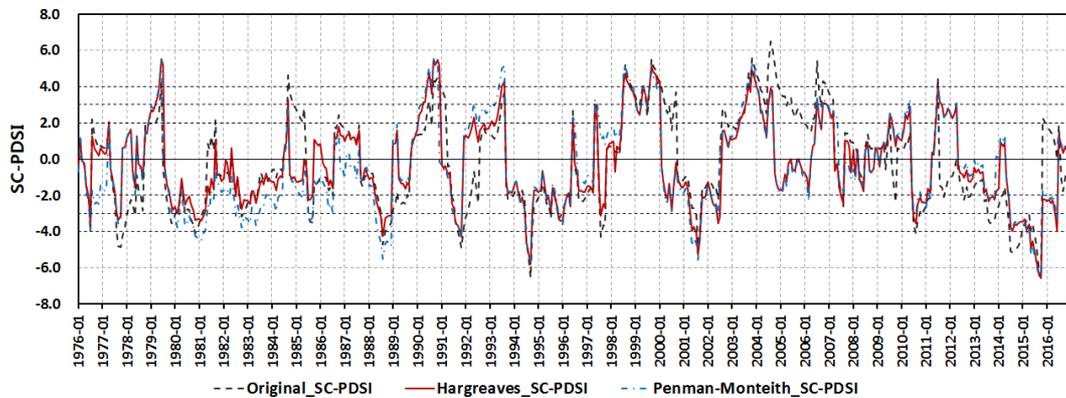


Fig. 3. Time series of SC-PDSI for Sokcho station

에 대한 산정 결과를 도시하여 나타낸 것이다.

기상청 56개 지점에 대한 세 가지 SC-PDSI 산정 결과를 이용하여 상관관계 분석을 수행하였다. 가장 정확한 잠재증발산량 산정 방법으로 알려져 있는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 산정된 결과(Penman-Monteith_SC-PDSI)를 기준으로 월별지수법에 의한 결과(Original_SC-PDSI)와 Hargreaves 수정 공식을 이용한 결과(Hargreaves_SC-PDSI)를 비교하였다. Fig. 4(a)는 기상청 56개 지점에 대해 산정된 Original_SC-PDSI와 Penman-Monteith_SC-PDSI의 월별 상관관계수 평균(box plot 안의 가로 bar) 및 최대(box plot의 상단), 최소(box plot의 하단)를 함께 도시하여 나타낸 것이며, (b)는 Hargreaves_SC-PDSI와 Penman-Monteith_SC-PDSI의 월별 상관관계수 평균 및 최대, 최소를 함께 도시한 것이다.

먼저 Original_SC-PDSI와 Penman-Monteith_SC-PDSI를 이용한 분석 결과를 살펴보면, 봄철과 겨울철 기간의 상관관계가 상대적으로 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 월별지수법에 의해 산정되는 잠재증발산량은 기온에 지배적인 영향을 받으므로 기온이 낮은 겨울철과 봄철 잠재증발산량이 Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 상대적으로 많은 차이를 보이기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 월별

지수법을 이용하여 PDSI를 산정할 경우, 봄철과 겨울철에 해당하는 월에는 실제 가뭄상황을 적절히 표현하는데 한계가 있을 것으로 예상할 수 있다. 두 번째로 Hargreaves_SC-PDSI와 Penman-Monteith_SC-PDSI를 비교한 결과, 모든 월에서 최소 0.7 이상의 상관관계를 나타내고 있다. 월별로 산정된 상관관계수의 56개 지점 평균은 모든 월에서 0.9 이상을 나타내고 있으며, 이는 Penman-Monteith_SC-PDSI와 Hargreaves_SC-PDSI의 거동이 매우 유사하게 나타나고 있음을 의미하는 결과라 할 수 있다. 잠재증발산량 산정 방법 중 Hargreaves 공식을 이용하는 방법은 기온자료만을 이용하는 방법이므로 예측된 기상자료가 충분치 않은 지역에서 잠재증발산량 산정 방법으로 Penman-Monteith 방법을 적용하기 어려운 조건에서 대안으로 활용하기에 충분한 방법으로 판단된다.

그러나 산정된 가뭄지수의 상관관계가 높게 나타난다는 것이 가뭄상황 판단의 일관성을 나타낸다고 보기는 어려울 수 있다. 이에 본 연구에서는 세 가지 잠재증발산량 산정 방법에 따라 산정된 SC-PDSI의 가뭄상황 판단 일관성을 확인하기 위해 ROC (Receiver Operating Characteristic) 분석 방법을 이용하였다. PDSI 가뭄상황 판단 기준을 고려하여 56개 지점에 대해 산정된 세 가지 가뭄지수를 기반으로 가뭄상황을

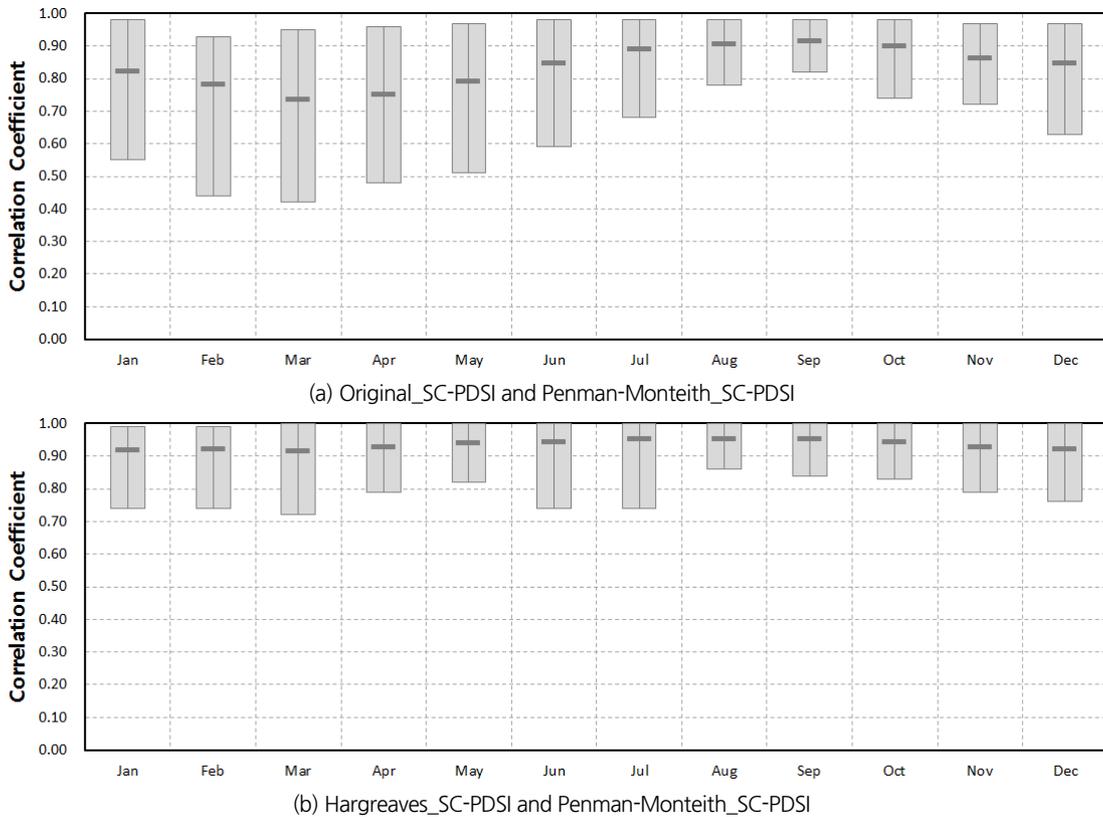


Fig. 4. Correlation analysis results for 56 stations

Table 1. Comparison results of drought classification for 56 stations

		Penman-Monteith_SC-PDSI			
		Normal	Moderate drought	Severe drought	Extreme drought
Original_SC-PDSI	Normal	19,145	1,086	211	55
	Moderate drought	1,312	1,320	562	109
	Severe drought	296	668	832	408
	Extreme drought	49	116	458	925
Hargreaves_SC-PDSI	Normal	19,930	647	74	18
	Moderate drought	774	2,002	396	24
	Severe drought	84	508	1,260	287
	Extreme drought	14	33	333	1,168

판단하였으며, Penman-Monteith_SC-PDSI의 가뭄상황 판단 결과와 다른 두 가지 SC-PDSI의 가뭄상황 판단 결과가 어느 정도 일치하는가를 검토하였다. Table 1은 56개 지점 전체 자료를 이용하여 PDSI의 가뭄상황 판단 기준에 따라 정상(normal), 보통가뭄(moderate drought), 심한가뭄(severe drought), 극한가뭄(extreme drought)으로 구분하고 세 가지 SC-PDSI의 가뭄상황 판단 결과를 상호 비교하여 정리한 것이다. Penman-Monteith_SC-PDSI를 이용하여 4단계로 가뭄상황을 먼저 판단한 후 해당 월에 대해 나머지 두 가지 방법에 의한 지수 산정결과를 검토하여 어떠한 가뭄상황을 나타내고 있는가를 확인한 후 빈도수를 표시한 것이다. Table 1에서 굵게 표시된 숫자는 Penman-Monteith_SC-PDSI와 나머지 방법에 의한 결과가 동일한 가뭄상황으로 판단한 횟수를 표시한 것이며, 이를 통해 월열지수법을 이용한 방법보다는 Hargreaves 수정 공식을 이용한 결과가 Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 유사한 가뭄상황 판단 결과를 나타내고 있

음을 알 수 있다. 월열지수법을 이용한 결과의 경우 Penman-Monteith 방법을 이용한 결과에서 가뭄으로 판단한 기간이 정상상태로 판단하고 있는 경우가 상대적으로 높게 나타나고 있다.

본 연구에서는 Table 1의 결과를 바탕으로 ROC 분석 방법을 적용하였다. ROC 분석 방법을 이용하기 위해 Sensitivity와 Specificity를 산정하고 그 결과를 그림으로 나타내었으며, 도시된 곡선 아래의 면적을 의미하는 AUC(Area Under Curve)를 산정하여 비교하였다. 산정된 AUC가 1에 가까운 값을 나타낼수록 기준이 되는 방법의 결과와 일관된 결과를 주는 것이라 판단할 수 있다. 이러한 기준에 따라 56개 지점에 대한 결과를 검토하였으며, Fig. 5(a)는 56개 지점에 대해 산정된 Sensitivity와 Specificity를 모두 나타낸 것이며, (b)는 56개 지점 평균을 도시하여 나타낸 것이다. Fig. 6은 56개 지점 중 서울, 강릉, 대전, 전주, 광주, 부산 등 6개 지점의 ROC 곡선을 도시한 것이며, Table 2는 56개 지점 결과를 정리한 것이다.

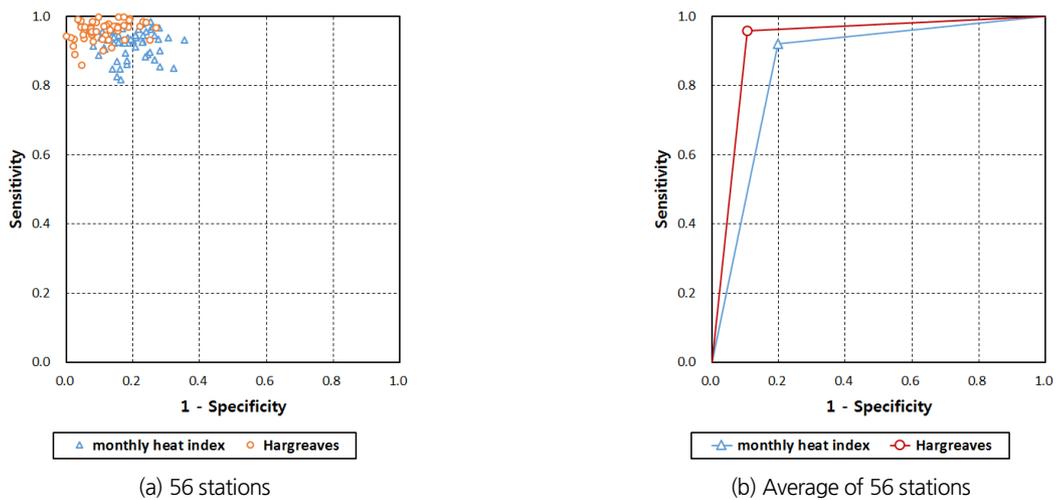


Fig. 5. ROC analysis results for 56 stations

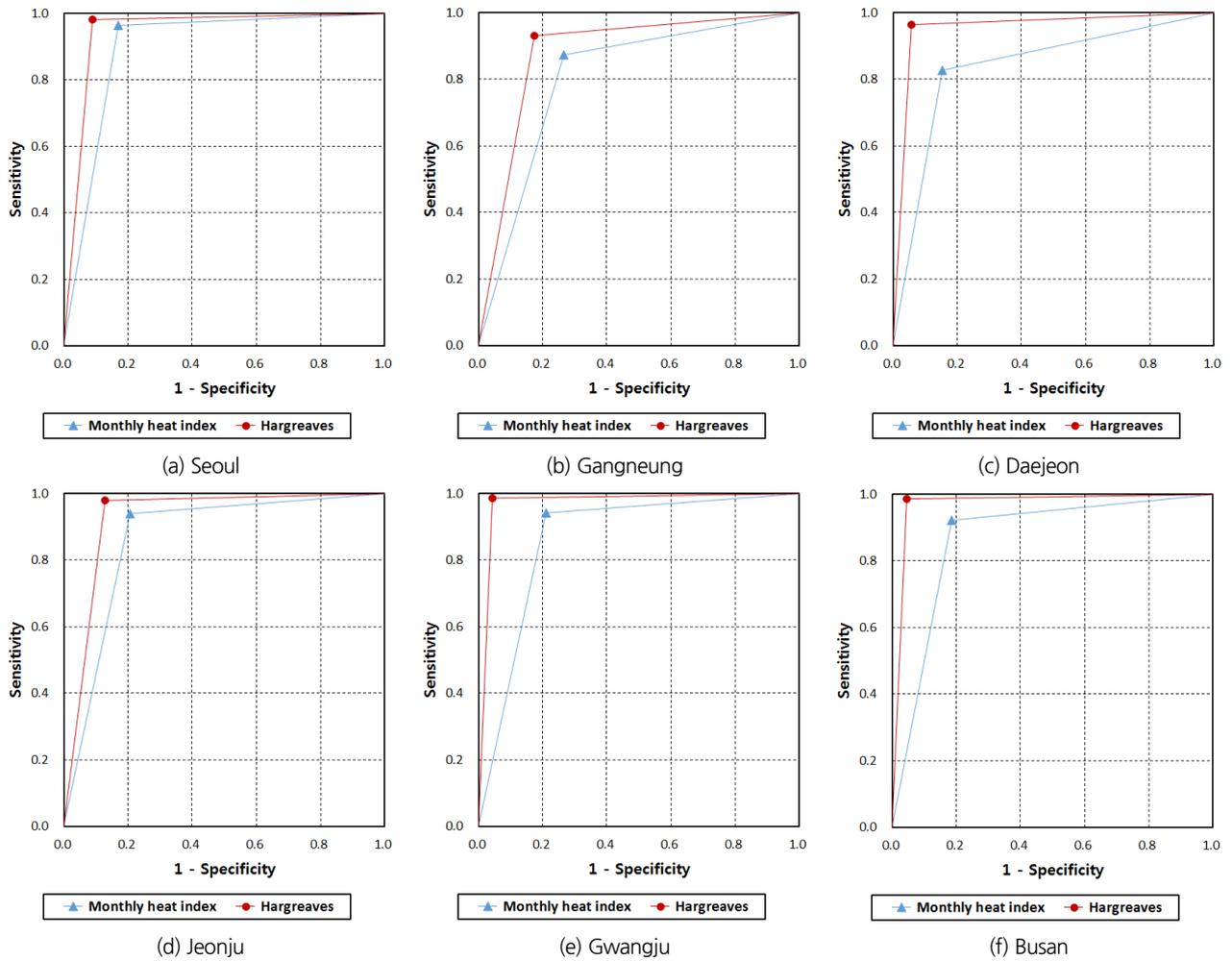


Fig. 6. ROC curves for 6 stations

Table 2. ROC curve analysis results for 56 stations

Code	Station	Monthly heat index vs Penman-Monteith			Hargreaves vs Penman-Monteith		
		Sensitivity	Specificity	AUC	Sensitivity	Specificity	AUC
000090	Sokcho	0.849	0.679	0.764	0.972	0.779	0.875
000100	Daegwallyeong	0.894	0.823	0.858	0.910	0.863	0.887
000101	Chuncheon	0.968	0.722	0.845	0.948	0.922	0.935
000105	Gangneung	0.874	0.734	0.804	0.931	0.825	0.878
000108	Seoul	0.964	0.832	0.898	0.982	0.911	0.946
000112	Incheon	0.984	0.746	0.865	0.971	0.847	0.909
000114	Wonju	0.955	0.891	0.923	0.915	0.978	0.947
000119	Suwon	0.931	0.646	0.788	0.931	0.750	0.841
000127	Chungju	0.943	0.864	0.903	0.935	0.976	0.955
000129	Seosan	0.900	0.720	0.810	0.947	0.924	0.936
000130	Uljin	0.934	0.724	0.829	0.945	0.883	0.914
000131	Cheongju	0.963	0.746	0.855	0.938	0.986	0.962
000133	Daejeon	0.826	0.847	0.836	0.965	0.944	0.954

Table 2. ROC curve analysis results for 56 stations (Continue)

Code	Station	Monthly heat index vs Penman-Monteith			Hargreaves vs Penman-Monteith		
		Sensitivity	Specificity	AUC	Sensitivity	Specificity	AUC
000135	Chupungnyeong	0.854	0.720	0.787	0.959	0.847	0.903
000138	Pohang	0.923	0.829	0.876	0.964	0.947	0.956
000140	Gunsan	0.913	0.919	0.916	0.927	0.919	0.923
000143	Daegu	0.959	0.853	0.906	0.985	0.922	0.953
000146	Jeonju	0.940	0.794	0.867	0.978	0.873	0.926
000152	Ulsan	0.891	0.756	0.823	0.969	0.926	0.948
000156	Gwangju	0.942	0.789	0.866	0.985	0.958	0.971
000159	Busan	0.922	0.813	0.868	0.986	0.955	0.971
000162	Tongyeong	0.939	0.693	0.816	0.967	0.931	0.949
000165	Mokpo	0.870	0.848	0.859	0.935	0.946	0.940
000168	Yoesu	0.884	0.762	0.823	0.933	0.891	0.912
000170	Wando	0.912	0.792	0.852	0.967	0.731	0.849
000192	Jinju	0.896	0.748	0.822	0.956	0.945	0.951
000201	Ganghwa	0.969	0.740	0.854	0.969	0.844	0.906
000202	Yangpyeong	0.979	0.773	0.876	0.954	0.924	0.939
000203	Icheon	0.929	0.800	0.865	0.961	0.945	0.953
000211	Inje	0.933	0.876	0.904	0.965	0.926	0.945
000212	Hongcheon	0.988	0.813	0.900	0.955	0.923	0.939
000221	Jecheon	0.922	0.857	0.890	0.946	0.950	0.948
000226	Boeun	0.848	0.839	0.843	0.973	0.879	0.926
000232	Cheonan	0.910	0.888	0.899	0.970	0.952	0.961
000235	Boryeong	0.938	0.895	0.917	0.943	1.000	0.972
000236	Buyeo	0.860	0.818	0.839	0.901	0.889	0.895
000238	Geumsan	0.873	0.817	0.845	0.997	0.843	0.920
000243	Buan	0.928	0.837	0.883	0.970	0.814	0.892
000244	Imsil	0.928	0.769	0.849	0.997	0.904	0.951
000245	Jeongeup	0.945	0.735	0.840	0.971	0.857	0.914
000247	Namwon	0.939	0.790	0.864	0.985	0.770	0.877
000260	Jangheung	0.937	0.816	0.876	0.932	0.872	0.902
000261	Haenam	0.849	0.861	0.855	0.889	0.974	0.931
000262	Goheung	0.817	0.836	0.827	0.859	0.955	0.907
000272	Yeongju	0.956	0.762	0.859	0.994	0.808	0.901
000273	Mungyeong	0.888	0.902	0.895	0.957	0.909	0.933
000277	Yeongdeok	0.963	0.783	0.873	0.973	0.826	0.900
000278	Uiseong	0.924	0.842	0.883	0.990	0.811	0.900
000279	Gumi	0.944	0.769	0.856	0.983	0.761	0.872
000281	Yeongcheon	0.924	0.771	0.848	0.961	0.867	0.914
000284	Geochang	0.944	0.843	0.894	0.997	0.826	0.912
000285	Hapcheon	0.939	0.857	0.898	0.968	0.955	0.962
000288	Miryang	0.933	0.807	0.870	0.966	0.844	0.905
000289	Sancheong	0.946	0.792	0.869	0.970	0.944	0.957
000294	Geoje	0.924	0.825	0.874	0.971	0.887	0.929
000295	Namhae	0.906	0.884	0.895	0.991	0.965	0.978

Fig. 7은 56개 지점에 대한 ROC 분석 결과를 요약한 것이며, 지점별로 산정된 Sensitivity, Specificity, AUC에 대한 평균(box plot 안의 가로 bar), 최대(box plot의 상단) 및 최소(box plot의 하단)의 범위를 정리한 것이다. 이때 Sensitivity의 의미는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 산정된 SC-PDSI가 정상상태로 판단하고 있을 때 월열지수법 및 Hargreaves 수정 공식을 이용하여 산정된 SC-PDSI도 정상상태로 동일하게 판단하는 경우의 비율을 나타내며, Specificity는 Penman-Monteith_SC-PDSI가 가뭄상태(보통가뭄, 심한가뭄, 극한가뭄 모두 포함)일 경우 월열지수법 및 Hargreaves 수정 공식을 이용하여 산정된 지수도 가뭄상태를 나타내는 경우의 비율에 해당한다. 그러므로 Sensitivity와 Specificity가 1.0에 가까운 값을 나타낼수록 Penman-Monteith 방법에 의한 SC-PDSI의 가뭄 및 정상상태 판단과 일관된 결과를 주게 됨을 의미한다. 이러한 기준에 따라 Table 2의 결과와 Fig. 7의 결과를 살펴보면, 월열지수법과 Penman-Monteith 방법에 의한 결과는 가뭄상황 판단에 있어 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, 월열지수법에 의한 결과보다는 Hargreaves 수정 공식을 이용한 결과가 개선된 지표를 나타내고 있음을 알 수 있다.

과거 Palmer (1965)는 PDSI를 제안한 보고서에서 잠재증발산량 산정을 위해 당시 가장 적합한 방법으로 판단한 월열지수법을 고려하였다고 언급하고 있으나 잠재증발산량 산정 방법으로 적합한 다른 방법이 존재할 경우 해당 방법으로 수정한 후 PDSI를 산정하는 것이 바람직하다는 의견을 제시하고 있다. 월열지수법의 경우 우리나라와 같은 기온특성에서는 앞서 확인한 바와 같이 동절기 과소 추정, 하절기 과다 추정될 가능성이 높은 방법이기 때문에 우리나라의 증발산 특성을 보다 효과적으로 나타낼 수 있는 방법으로 대체하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 점을 고려할 경우 가장 바람직한 방안은 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정

하고 그 결과를 이용하여 PDSI를 산정하는 방안이라 할 수 있다. 다만, 예측된 기상자료가 충분치 않을 경우에는 기온자료만을 이용하는 Hargreaves 공식을 이용하여 가뭄지수를 산정하는 방법도 충분히 고려할 만한 대안이라 할 수 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 우리나라에서 PDSI를 가뭄관리 및 모니터링에 보다 효과적으로 활용할 수 있도록 지수 산정 방법과 관련하여 개선이 필요한 사항에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 기존 PDSI의 한계를 개선하여 제시된 SC-PDSI를 이용하여 기상청 56개 지점에 대해 적용하였으며, 잠재증발산량 산정 방법을 중심으로 개선 방안에 대한 분석 및 검토를 수행하였다. 기존 PDSI 산정 과정에서 이용하고 있는 월열지수법, 잠재증발산량 산정 방법 중 가장 정확한 결과를 주는 것으로 알려져 있는 Penman-Monteith 방법, 기온자료를 이용한 잠재증발산량 산정 방법 중 그 결과가 비교적 정확한 것으로 알려져 있는 Hargreaves 공식 등 세 가지 잠재증발산량 산정 방법을 PDSI 산정 과정에 적용하고 그 결과를 검토하였다.

먼저 기상청 56개 지점에 대해 세 가지 방법에 의한 잠재증발산량을 산정하여 월별로 비교한 결과, 기존 PDSI에서 이용하고 있는 월열지수법은 우리나라의 증발산 특성을 정확하게 반영하기 어려운 한계가 있음을 확인할 수 있었으며, 이로 인해 가뭄 모니터링 과정에서 정확한 정보 생산이 어려울 수 있음을 알 수 있었다. 기상청에서 제공하고 있는 지점별 월 증발량 평년값과의 비교를 통해 Penman-Monteith 방법이 월별 변동 패턴을 정확하게 나타내고 있음을 확인하였으며, 기온자료만을 이용하는 Hargreaves 공식에 의한 결과도 월열지수법보다 정확하게 월별 패턴을 재현하고 있음을 알 수 있었다.

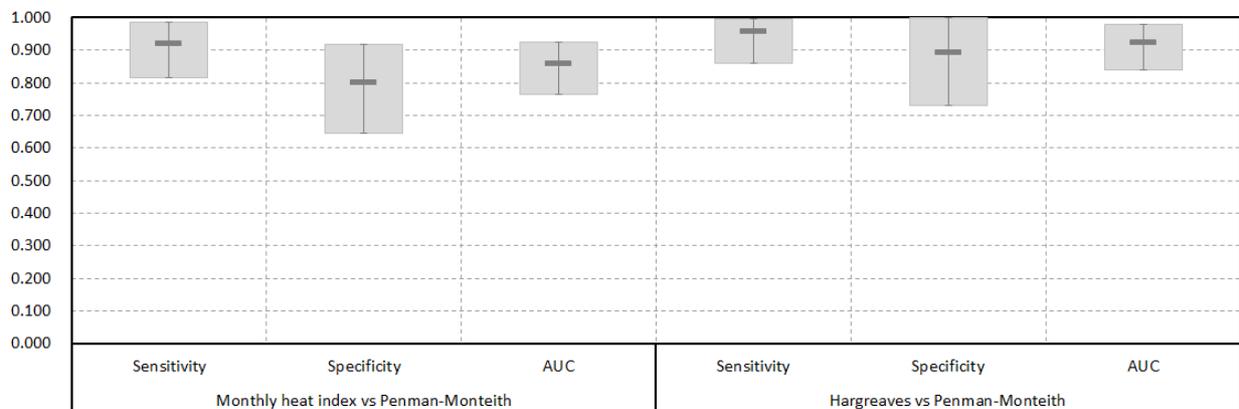


Fig. 7. Summary of ROC curve analysis results

두 번째로 세 가지 잠재증발산량 산정 방법을 이용하여 SC-PDSI를 산정하고 그 결과를 검토한 결과, Penman-Monteith 방법을 이용하여 산정된 SC-PDSI를 기준으로 월열지수법에 의한 결과는 상대적으로 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었으며, 특히 봄철과 겨울철 기간에 대해 산정된 결과에서 상대적으로 큰 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 기온자료만을 이용하는 잠재증발산량 산정 방법인 Hargreaves 공식의 경우에는 지점별로 차이는 있으나 Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인하였으며, 월별로 검토한 결과에서도 월열지수법에 비해 Penman-Monteith 방법에 의한 결과와 유사한 결과를 나타내고 있었다.

따라서 우리나라와 같이 동절기 평균 기온이 0°C 이하로 떨어지는 지역이 존재하는 경우에는 월열지수법을 이용하여 PDSI를 산정하는 것이 적절치 않다고 판단할 수 있으며, 향후 우리나라에서 PDSI를 산정하고자 할 경우 Penman-Monteith 방법을 기준으로 활용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 다만, Penman-Monteith 방법을 이용하기 위해서는 기온, 풍속, 이슬점온도, 일조시간 등 상대적으로 많은 자료를 필요로 하므로 계측자료가 충분치 않을 경우 Penman-Monteith 방법을 이용하기 어려운 상황이 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 기온 자료만을 이용하여 잠재증발산량 산정이 가능한 방법을 대안으로 채택할 필요가 있으며, 평균 기온이 0°C 이하로 떨어지는 경우에도 잠재증발산량 산정이 가능한 Hargreaves 공식과 같은 방법을 이용하여 PDSI를 산정하는 방안을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서는 실제 우리나라에서 발생한 과거 가뭄사상과의 비교를 수행하지 못한 한계가 있으며, 향후 실제 가뭄사상과의 분석을 통해 우리나라에서 가뭄감시를 위해 효과적으로 활용할 수 있는 가뭄지표에 대한 확인이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국기상산업진흥원의 “기상See-AT기술개발” 사업의 연구비 지원으로 수행한 ‘가뭄관리를 위한 전략적 대응 기법 개발(KMIPA 2015-6190)’ 과제에 의해 수행되었습니다.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L. S. (1994). *An update for the definition of the reference evapotranspiration*. ICID Bulletin, New Delhi, Vol. 43, No. 2, pp. 1-34.
- Alley, W. M. (1984). “The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions.” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, pp. 1100-1109.
- Droogers, P., and Allen, R. G. (2002). “Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions.” *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, pp. 33-45.
- Gavilan, P., Lorite, I. J., Tornero, S., and Berengena, J. (2006). “Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment.” *Agricultural Water Management*, Vol. 81, pp. 257-281.
- Hargreaves, G. H. (1994). “Defining and using reference evapotranspiration.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 1132-1139.
- Hargreaves, G. H., and Allen, R. G. (2003). “History and evaluation of hargreaves evapotranspiration equation.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 53-63.
- Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. (1985). “Reference crop evapotranspiration from temperature.” *Applied Engineering in Agriculture*, ASAE, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., and Riley, J. P. (1985). “Irrigation water requirements for Senegal river basin.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 265-275.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 70, p. 360.
- Jung, J. H., and Yoon, Y. N. (2003). *Water resource design practice*.
- Karl, T. R., and Knight, R. W. (1985). *Atlas of monthly palmer hydrological drought indices (1931-1983) for the contiguous United States*. Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Lee, D. R., Moon, J. W., Lee, D. H., and Ahn, J. H. (2006). “Development of water supply capacity index to monitor droughts in a reservoir.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.
- Lee, K. H., and Park, J. H. (2008). “Calibration of the hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation on a nation-wide scale.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 6B, pp. 675-681.
- Lee, K. H., Cho, H. Y., and Oh, N. S. (2008). “Calibration and validation of the hargreaves equation for the reference evapotranspiration estimation in Gyeonggi bay watershed.” *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 4, pp. 413-422.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kieist, J. (1993). *Drought monitoring with multiple time series*. 8th Conf. on Applied Climatology, Boston, American Meteorological Society, pp. 179-184.
- 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.
- Moon, J. W., Jung, C. G., and Lee, D. R. (2013). "Parameter regionalization of hargreaves equation based on climatological characteristics in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 9, pp. 933-946.
- New, M., Lister, D., Hulme, M., and Makin, I. (2002). "A high-resolution data set of surface climate over global land areas." *Climate Research*, Vol. 21, pp. 1-25.
- Oh, N. S., and Lee, K. H. (2004). "Calculation of evapotranspiration based on daily temperature." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 37, No. 6, pp. 479-485.
- Oh, N. S., Lee, K. H., and Ko, Y. C. (2002). "Capability of evapotranspiration estimation with short field data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 22, No. 6-B, pp. 795-801.
- Palmer, W. C. (1965), *Meteorological drought*, U.S. Dept. of Commerce Weather Bureau, Research Report No. 45.
- Rim, C. S. (2008). "Comparison of evapotranspiration estimation approaches considering grass reference crop." *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 2, pp. 212-228.
- Shafer, B. A., and Dezman, L. E. (1982). *Development of surface water supply index to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas*. Proceedings of the Western Snow Conference, pp. 164-175.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Pereira, L. S., Perrier, A., and Pruitt, W. O. (1991). *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Land and Water Development Division, United Nations Food and Agriculture Service, Rome.
- Temesgen, B., Allen, R. G., and Jensen, D. T. (1999). "Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 26-33.
- Thornthwaite, C. W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geographical Review*, Vol. 38, pp. 55-94.
- Vanderlinden, K., Giraldez, J. V., and Meirvenne, M. V. (2004). "Assessing reference evapotranspiration by the hargreaves method in Southern Spain." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 184-191.
- Wells, N., Goddard, S., and Hayes, M. J. (2004). "A self-calibrating palmer drought severity index." *Journal of Climate*, Vol. 17, pp. 2335-2351.
- 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, Fort Belvoir, VA.