



Palmer 가뭄지수에 대한 재고찰



강 부 식 |

단국대학교 토목환경공학과 조교수
bskang@dankook.ac.kr

정결과의 오류도 상당부분 존재하는 것이 사실이다. 본 연구에서는 이러한 오류를 최소화하기 위한 방법론을 소개하고 이에 따른 산정결과를 타 가뭄지수와 비교해 보고자 한다.

1. 서론

2008년도와 2009년 상반기에 걸쳐 전국적으로 극심한 가뭄이 발생하면서 가뭄방제에 관한 관심이 고조되고 있다. 가뭄을 표현하는 가뭄지수는 표준강우지수(SPI; Standard Precipitation Index)부터 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index) 등에 이르기까지 다양하게 개발되어 왔다. 파머가뭄지수(PDSI; Palmer Drought Severity Index)는 1965년 미국 상무성(Department of Commerce) 기후국(Department of Climatology)의 Wayne C. Palmer에 의하여 최초로 제안(Palmer, 1965)되어 가뭄을 표현하는 유력한 수단으로 사용되어 왔다. 하지만 산정과정이 복잡하고 가용한 자료를 확보하기 어려워 실용적이지 못하다는 단점이 꾸준히 지적되어 왔다. 한편으로는 PDSI지수를 국내에 적용함에 있어서 최초 제시된 매개변수를 그대로 사용한다든지 토양심도의 지역적 변화를 고려하지 않음으로 인한 산

2. 파머가뭄지수의 산정

PDSI는 미국 내 여러 지역에서의 강수량, 기온 및 일조시간 등의 자료를 사용해서 Thornthwaite와 Mather(1955)의 월 열지수법(monthly heat index method)으로 잠재증발산량을 추정 후, 대상 지역의 실제 강수량과 기후학적으로 필요한 강수량의 차에 대한 계산을 통해 얻어지게 된다. 즉, 강수량과 기온 자료뿐만 아니라 지역적 유효토양수분량에 근거하여 산정된다. 입력 자료들로부터 증발산량, 함양량, 유출량 및 손실량을 포함하여 물수지방정식의 모든 기본적인 사항들이 결정된다.

PDSI는 강수량과 기온 자료뿐만 아니라 지역적 유효토양수분량에 근거하여 산정된다. 입력 자료들로부터 증발산량, 함양량, 유출량 및 손실량을 포함하여 물수지방정식의 모든 기본적인 사항들이 결정되며 PDSI 산정을 위한 기본 요소는 다음과 같다.



표 1. PDSI 산정에 필요한 구성요소

구분		설명
PE	Potential Evapotranspiration	잠재증발산량
PR	Potential Recharge	잠재 공급량
PRO	Potential Runoff	잠재유출량
PL	Potential Loss	잠재손실량
ET	Evapotranspiration	증발산량
R	Recharge	공급량
RO	Runoff	유출량
L	Loss	손실량
AWC	Available Water Holding Capacity	토양 유효용량
Ss	Surface Soil Moisture Content	상부 층 수분함량
Su	Underlying Soil Moisture Content	하부 층 수분함량

(가) 잠재증발산량 추정

Palmer는 잠재증발산량을 추정하기 위하여 Thornthwaite와 Mather(1955)가 제안한 월 열수 지방법 이용하였다.

1) 월 열지수

$$j = \left(\frac{t_n}{5}\right)^{1.51} = 0.0875t_n^{1.51} \quad n=1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

2) 연 열지수

$$J = \sum_{n=1}^{12} j_n \quad n=1, 2, \dots, 12 \quad (2)$$

3) 월 잠재증발산량

- 1개월 평균 30일, 월평균 일조시간이 12시간 일 때의 이론치.

$$PET_x = 1.62\left(\frac{10t}{J}\right)^a \quad [cm/month] \quad (3)$$

$$a = (675 \times 10^{-9})J^3 - (771 \times 10^{-7})J^2 + (179 \times 10^{-4})J + 0.49239 \quad (4)$$

4) 특정 월 평균 기온 t_n °C 에서의 PE

$$PET = PET_x \frac{DT}{30 \times 12} \quad [cm/month] \quad (5)$$

여기서, D: 잠재증발산량 산정하고자 하는 달의 일수

T: 잠재증발산량 산정하고자 하는 일조시간

$$a = (675 \times 10^{-9})J^3 - (771 \times 10^{-7})J^2 + (179 \times 10^{-4})J + 0.49239 \quad (6)$$

(나) 물 수지 분석

토양수분저장량은 토양을 상부와 하부의 2개 층으로 나누어 상부 층은 1inch(25.4mm)의 수분을 저장할 수 있고 하부층은 토양의 성질에 따라 유효용량이 결정되는 것으로 하부 층의 수분은 상부 층의 수분이 모두 제거 될 때까지 손실되지 않으며 하부 층 손실량은 초기수분함유량과 산정된 PE 및 AWC에 따라 결정되는 것으로 가정한다.

Thornthwaite방법에 의해 계산되어진 잠재증발



산량(PE)이 강수량(P)보다 클 경우 토양수분손실이 발생한다.

$$L_s = \min[S_s, (PET - P)] \quad (7)$$

$$L_u = (PE - P - L_s) \frac{S_u}{AWC}, \quad L_u \leq S_u \quad (8)$$

여기서, L_s = 상부 층의 수분손실

L_u = 하부 층의 수분손실

$$L = L_s + L_u$$

S_s = 해당 월이 시작될 때 상부 층에 저장된 유효수분

S_u = 해당 월이 시작될 때 하부 층에 저장된 유효수분

AWC = 상부와 하부 층 유효용량의합

Palmer의 방법에서 수분수지분석을 위해서는 PE와 함께 PR, PL, PRO의 변량이 추가되어 계산된다.

1) PR (잠재공급량, 토양의 수분함유량을 포화상태로 만들기 위해 요구되는 수분량)

$$PR = AWC - (S_s + S_u) \quad (9)$$

2) PL (잠재 손실량, 강우가 없는 기간 동안 토양으로부터 증발산에 의해 손실될 수 있는 수분량)

$$PL = PL_s + PL_u \quad (10)$$

$$PL_s = \min[PE \text{ or } S_s] \quad (11)$$

$$PL_u = (PE - PL_s) \frac{S_u}{AWC}, \quad PL_u \leq S_u$$

3) PRO (잠재유출량, 토양의 총 유효용량에서 잠재공급량 뺀 값으로 토양 총 유효용량에 비례하며 잠재공급량에 반비례)

$$PRO = AWC - PR = AWC - (AWC - S) = S \quad (12)$$

4) $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 계수

월별 수분수지분석을 통해 계산된 값들을 이용해

지역별로 보정기간에 대한 잠재평균량과 실제평균량에 대한 비율로 증발산계수(α), 공급량계수(β), 유출량계수(γ), 손실량계수(δ)를 계산할 수 있다. $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 계수들은 잠재량(PET, PR, PRO, PL)에 대한 실제값의 비율로 정의된다. 이 비율은 수분평형계수(water balance coefficients)로 이 비율은 시기별 변화를 고려하여 잠재치를 수정하는 역할을 한다.

- α 는 보통 습한 기후에서는 '1'에 접근하고 매우 건조한 지역에서는 0에 가깝다.

- β 는 강수량이 많고 증발산이 적은 초봄에 가장 높고 한 여름에 가장 낮다.

- γ 는 여름에는 0에 가깝고 봄철에 가장 크다.

- δ 는 겨울철에는 0이고 여름에는 0.2~0.6의 범위이다.

이들 4개의 계수가 산정되면 해당 월에 대상 지역의 정상적인 기후에서 증발량, 유출량, 토양 수분 저류량을 유지시키기 위해 필요한 강수량을 계산할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{\sum_{all\ year} ET_i}{\sum_{all\ year} PET_i}, \quad i = (1, 2, \dots, 12) \quad (13)$$

$$\beta_i = \frac{\sum_{all\ year} R_i}{\sum_{all\ year} PR_i}, \quad i = (1, 2, \dots, 12) \quad (14)$$

$$\gamma_i = \frac{\sum_{all\ year} RO_i}{\sum_{all\ year} PRO_i}, \quad i = (1, 2, \dots, 12) \quad (15)$$

$$\delta_i = \frac{\sum_{all\ year} L_i}{\sum_{all\ year} PL_i}, \quad i = (1, 2, \dots, 12) \quad (16)$$

5) 기후학적으로 필요한 강우량 (\hat{P})



구해진 각각의 계수는 과거자료로부터 얻어진 평균치이고 특정년도에 대한 잠재량에 계산된 계수를 곱한 값은 정상평균치로 기후학적으로 필요한 (CAFEC : Climatically Appropriate For Existing Conditions) 값이라 부른다.

$$CAFEC \quad ET(\widehat{ET}) = \alpha_i PET \quad (17)$$

$$CAFEC \quad R(\widehat{R}) = \beta_i PR \quad (18)$$

$$CAFEC \quad RO(\widehat{RO}) = \gamma_i PRO \quad (19)$$

$$CAFEC \quad L(\widehat{L}) = \delta_i PL \quad (20)$$

그러므로 대상지역에 기후학적으로 필요한 강우량 (\widehat{P})는 다음과 같다.

$$\widehat{P} = \widehat{ET} + \widehat{R} + \widehat{RO} + \widehat{L} = \alpha_i \cdot PET + \beta_i \cdot PR + \gamma_i \cdot PRO - \delta_i \cdot PL \quad (21)$$

(다) 수분편차의 선정

각각의 달에서 \widehat{P} 가 구해지면 실제 강우량과 CAFEC 강우량의 차이인 수분편차가 계산이 가능하다. 수분편차란 주어진 한 달 동안의 토양수분의 부족 또는 초과를 말한다. 즉, 자연 강수량과 주어진 기후조건에서 소비 또는 손실되는 수분 량의 차이이다.

$$d = P - \widehat{P} = P - (\alpha_i \cdot PE + \beta_i \cdot PR + \gamma_i \cdot PRO - \delta_i \cdot PL) \quad (22)$$

여기서, P = 강수량
 \widehat{P} = 적정 강수량
 d = 수분 편차
 i = 당해 월

(라) PDSI 산정공식

1) 기후특성 인자 K

수분편차를 이용하여 지역적 가뭄심도를 비교할 경우, 가장 극심했던 가뭄의 정도가 서로 다른 지역에 대해 수분편차만을 이용해 가뭄의 심도를 비교하는 것은 적절하지 않을 수 있기 때문에 시·공간적 편차를 보정하기 위해 기후 특성인자 K를 제시하였다.

$$Z_i = K_j d = K_j (P - \widehat{P}) \quad (23)$$

여기서, Z_i = 수분 이상 지수(moisture anomaly index)

$$Z_i = K_j [P - (\alpha_i \cdot PE + \beta_i \cdot PR + \gamma_i \cdot PRO - \delta_i \cdot PL)] \quad (24)$$

$$K_j = \frac{17.67 K'_j}{\sum_{j=1}^{12} D_j \times K'_j} \quad (25)$$

여기서, K'_j = 기후특성인자 (j = 1, 2, ..., 12)

d = 수분편차

$$K'_j = 1.5 \log_{10} \left\{ \frac{T_j + 2.8}{D_j} \right\} + 0.5 \quad (26)$$

여기서, D_j = 수분편차(d) 절대 값의 월별 평균치

$$T_j = \left(\frac{\overline{PE_j} + \overline{R_j} + \overline{RO_j}}{\overline{P_j} + \overline{L_j}} \right) \quad (27)$$

여기서, T_j = 대상지역의 수분요구량과 수분공급량의 비

2) PDSI 공식

K와 d를 통해 계산되는 수분 이상지수 Z와 전월의 가뭄지수를 이용해 가뭄지수 X를 구하는 공식을 유도하였다.

$$X_i = X_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3} \right) - 0.103 X_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (28)$$



$$X_i = 0.897X_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right) \quad (29)$$

여기서, X_i = 가뭄지수(= PDSI)

$$PDSI_i = 0.897 PDSI_{i-1} + \left(\frac{Z_i}{3}\right) \quad (30)$$

PDSI의 결과로 가뭄강도를 정의하기 위한 가뭄 분류는 표 2와 같다.

표 2. PDSI에 따른 습윤기와 건조기의 범위

가뭄지수의 범위	수분 상태
4.0 이상	Extremely wet
3.0~4.0	Very wet
2.0~3.0	Moderately wet
1.0~2.0	Slightly wet
0.5~1.0	Incipient wet spell
-0.5~0.5	Near normal
-1.0~-0.5	Incipient drought
-2.0~-1.0	Mild drought
-3.0~-2.0	Moderate drought
-4.0~-3.0	Severe drought
-4.0 이하	Extreme drought

3. 토양심도의 지역별 분포를 고려한 PDSI 지수 산정

PDSI 지수를 산정하는 과정에서 토양의 유효용량에 따른 물수지 방정식을 통해 각 잠재량들을 구하는 과정은 기후학적으로 필요한 값을 결정하는 매우 중요한 과정이다. 하지만 기존의 PDSI지수 산정 시, 모든 지역에서 상하부토양심도를 지역적 분포를 고려하지 않고 10inch(25.4cm)로 일정하게 사용함으로써 유효 토양수분함량에 대한 신뢰도를 저하시키는 결과를 가져오는 경향이 있었다. 이에 본 연구에서는 속

초, 춘천, 강릉 등 총 55개의 강우관측소를 선정하고 각 지역에 따른 GIS 정밀토양도를 사용하여 관측소의 반경 10km이내 지역의 암석지를 제외한 토양심도의 평균값을 이용하여 지역적 분포에 근거한 토양수분함량을 계산한 후 물수지 분석을 실시하고 그에 따른 PDSI 지수를 산정하여 그 영향을 분석하고 기존의 PDSI 지수값과 비교 분석하였다.

3.1 대상기간

기존의 PDSI 지수와 비교하기 위하여 대상기간은 기준 갈수년인 '94년 1월 ~'95년 12월과 '01년 1월 ~'01년 12월을 채택하였다. '94년 1월 ~'95년 12월은 장기 가뭄으로 1994년 7월 초 전남, 경남지역에서 발생하기 시작하여 경북, 전북, 충북, 충남 등으로 점차 확산되었다. 1995년도의 가뭄은 1994년 여름철부터 절대강우량의 부족으로 인해 발생한 가뭄의 연장선이었으며 남부지방의 가뭄을 더욱 극심한 상태로 만들었고 동시에 전국적인 가뭄상황을 야기하기 시작했다. 2001년은 단기가뭄으로 1월 및 2월 사이의 많은 강설량에도 불구하고 3월부터 하천수량이 줄어들기 시작하여 6월 중순 호우가 발생하기 전까지 전국적인 강수량이 예년평균의 20~40%의 수준으로 심각한 봄 가뭄 현상을 나타내었다. 2001년의 가뭄은 8월 이후부터 가을가뭄으로 이어져 중부지방을 중심으로 9월부터 12월까지 다시 극심한 가뭄상태를 나타내었다.

3.2 토양심도의 지역적 분포

지역별 분포를 고려한 토양심도에 따른 PDSI 지수를 산정하기 위하여 GIS 정밀토양도를 이용하여 관측소의 반경 10km이내의 암석지를 제외한 지역의 토양심도의 분포에 따른 평균값을 계산하였다. 그 결



표 3. 토양심도의 범위

NO.	토양심도 범위	토양심도
1	매우깊음	150cm이상
2	깊음~매우깊음	150cm
3	깊음	100~150cm
4	보통~깊음	100cm
5	보통	50~100cm
6	얕음~보통	50cm
7	얕음	20~50cm
8	매우얕음	20cm
49	암석지	20cm 이하

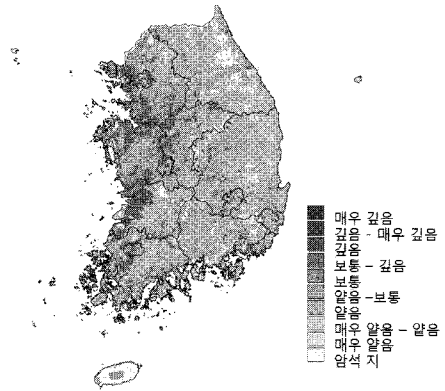


그림 1. 전국 토양심도 분포

과 대부분의 지역에서 보통 깊이를 나타내는 50cm이상의 토양심도를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 기존에 일정하게 사용했던 토양심도 25.4cm와는 2배 이상의 차이를 나타내는 것으로 토양심도의 값이 토양수분함량을 결정하기 때문에 PDSI 지수 산정에 있어서 영향을 미칠 것으로 판단이 되었다. 이에 따라 지역적 분포에 따라 계산된 토양심도를 이용하여 기준갈수년인 '94년 1월 ~ '95년 12월과 '01년 1월 ~ '01년 12월에 대하여 PDSI 지수를 재 산정하였다. 토

양심도에 대한 범위는 표 3과 같다.

3.3 산정결과 및 SPI 지수와의 비교

본 연구에서 각 지역에 대한 평균 토양심도 값을 계산한 결과 기존에 사용했던 25.4cm의 토양심도와 다르게 50cm이상의 토양심도를 가지는 지역이 대부분이었기 때문에 이에 대한 영향을 확인하기 위하여 기존의 PDSI 지수 및 기상학적 가뭄지수인 SPI와 비

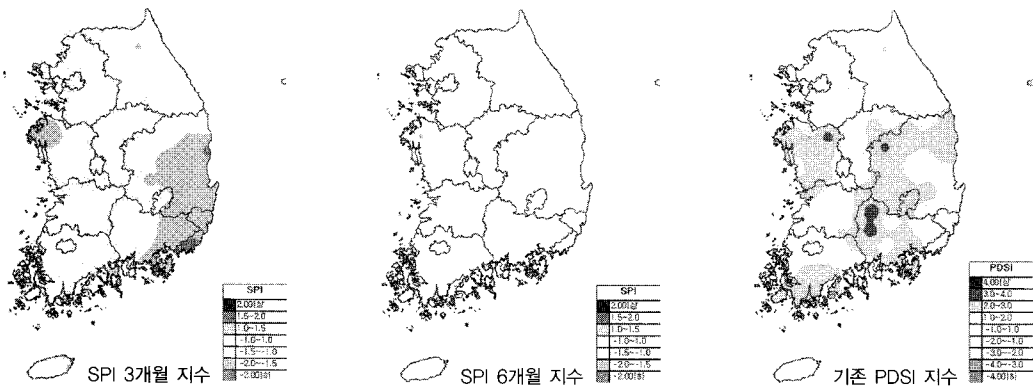


그림 2. 2001년 4월23~4월29일

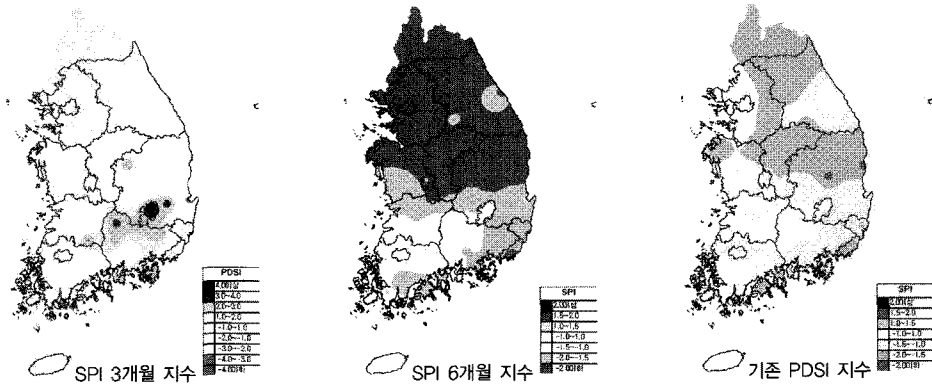


그림 3. 2001년 5월21~5월27일

교하여 가뭄의 판단정도를 알아보았다. 비교해 본 결과 기준 갈수년인 1994~1995년 및 2001년은 각각 장기, 단기 가뭄에 대하여 SPI 지수는 강우 하나만을 입력 자료로 사용하기 때문에 가뭄에 빠르게 반응하는 장점을 가지고 있었으며 기존의 PDSI지수는 SPI 지수에 비해 다소 반응이 느린 것을 볼 수 있었다. 하지만 지역적인 분포를 이용한 토양심도값을 사용하여 산정한 PDSI는 기존의 PDSI 지수보다 가뭄을 더 빠르게 판단함으로써 SPI 지수와 비슷한 결과를 나타내고 있었다. 이는 가뭄을 판단하는 능력이 기존의 지수보다 더 향상되었음을 나타내는 것으로 토양심도의 값이 PDSI 지수 산정에 있어서 중요한 요인으로 작용하고 있는 것으로 나타낸다. 이러한 결과로서 미국의 자료를 기반으로 산정했던 기존의 PDSI 지수를 좀 더 정확하게 우리나라에 적용하여 가뭄을 판단하기 위해서는 토양심도의 값을 일정한 값이 아닌 지역적인 분포를 이용한 값을 산정하여 이용하는 것이 중요하다. 다음은 2001년의 봄 가뭄에 대해 비교한 결과를 나타낸 것이다(그림 2, 3).

4. 맺는 말

우리나라의 지형은 기복이 심하고 복잡하여 일반적으로 산악지, 구릉지, 산록경사지, 곡간지, 선상지, 대지 및 평탄지 등으로 구분할 수 있다. 기존의 PDSI 지수 산정 시에는 이렇게 특성이 다른 지역의 분포를 전혀 고려하지 않고 일정한 토양심도 값을 사용하였다. 하지만 본 연구에서는 총 55개의 각 관측소의 10Km이내에 해당하는 지역의 분포를 고려하여 토양심도의 평균값을 계산하고 PDSI 지수를 산정함으로써 가뭄 판단에 대한 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

이를 위해 기준갈수년에 대하여 기존의 PDSI 지수 및 지역별 분포를 고려한 지수로 구분하여 비교한 결과 지역별 토양심도를 고려한 지수가 가뭄을 좀 더 빠르게 잘 표현하고 있음을 확인함으로써 토양심도의 영향이 PDSI 지수 산정에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 가뭄에 대해 반응이 빠른 기상학적 가뭄지수인 SPI 지수와 비교한 결과를 보면 역시 기존의 지수보다 SPI 지수와 더 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 지역적인 분포를



고려한 값이 가뭄을 더 잘 표현하고 있음을 말해주는 것으로 이러한 결과에 따라 우리나라의 가뭄을 좀 더 정확하게 판단하고자 하기 위해서는 지역적인 분포를

고려한 토양심도의 값을 사용하는것이 가뭄에 대한 신뢰도를 높일 수 있다고 판단된다. ☞

참고문헌

Palmer. W.C. (1965). Meteorological Drought, Office of Climatology U.S. Weather Bureau, Washington, D.C

Thornthwaite, C. W., and Mather, J. R. (1955), "The water balance", Climatology, Vol. 8, No. 1, Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, N. J.