



가뭄감시를 위한 SC-PDSI 활용 방안



문 장 원

한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원
jwmoon@kict.re.kr



이 동 일

한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원
dryl@kict.re.kr

1. 머리말

가뭄은 홍수와 함께 물로 인해 발생하는 대표적인 자연재해라 할 수 있으며, 비정상적인 수분 부족 현상이 지속되어 나타나게 되는 수문학적 현상이다. 가뭄은 반복적으로 발생하는 기후특성으로 과거부터 현재까지 지속적으로 되풀이되어 왔으며, 미래에도 계속하여 나타나게 될 것이다. 홍수는 단기간동안 좁은 지역에서 피해가 집중되어 발생하는 특징이 있는 반면, 가뭄은 장기간동안 매우 넓은 지역에서 피해가 발생하는 등 상반된 특징을 나타내는 현상이다. 홍수의 경우 기상에 대한 단기예측 성과를 이용하여 발생 지역을 비교적 정확하게 예측할 수 있으나 가뭄은 장기간 지속되는 특징으로 인해 즉각적으로 인지하기 어려우며, 장기 기상전망의 불확실성으로 장래 예측이 매우 어렵다. 또한 가뭄은 광범위한 지역에서 발생하고 장기간 지속되므로 가뭄 발생 후 이에 효과적으로 대처하지 못할 경우 그 피해는 기하급수적으로

증가할 가능성이 있다.

이와 함께 전 세계적으로 나타나고 있는 지구 온난화 및 기후변화는 가뭄을 포함한 물 관련 재해의 발생 특성에 영향을 미치고 있다. 1990년 이후 2~3년마다 큰 가뭄을 겪고 있으며(한국수자원공사, 2002), 기후변화로 인해 향후에는 강수량의 변동 폭이 증가하여 극단적으로 비가 적게 내리는 해가 많아질 것으로 전망되고 있다(국토해양부, 2010). 특히, 지구 온난화로 인한 평균기온의 상승은 증발산량의 증가를 초래하여 이용 가능한 수자원의 감소로 이어질 가능성이 있으며, 이는 강수량의 변동 폭 증가와 함께 장래 가뭄으로 인한 피해가 증가할 수 있음을 의미한다.

가뭄에 효과적으로 대처하기 위해서는 가뭄과 관련된 다양한 기상 및 수문인자들에 대한 지속적인 모니터링을 수행함으로써 가뭄의 시작을 파악할 수 있는 체계를 갖추는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 가뭄의 모니터링은 가뭄지수를 산정하고 이를 검토함으로써 이루어지고 있으며, 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI; Palmer, 1965), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI; Shafer and Dezman, 1982), 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI; McKee et al., 1993) 등 다양한 가뭄지수가 개발되어 이용되고 있다. 이중 PDSI는 강수량, 기온 등 기상인자와 분석 대상 지역의 유효토양수분량을 이용하여 산정되는 가뭄지수로 1965년 Palmer에 의해 개발되었으며, 현재까지 가뭄관리를 위해 세계적으로 널리 이용되고 있다. 그러나 PDSI는 수분수지 모형의 단순화에 따른 문제점 등 가뭄지수를 산정하는 과정에서 여러 가지 한계를 포함하고 있음이 지적된 바 있다



(Alley, 1984; Karl and Knight, 1985; Wells et al., 2004; Mo and Chelliah, 2006). 이러한 연구 중 Wells et al.(2004)은 PDSI가 지역적으로 일관된 기준 하에 산정되고 있음을 확인하고 이러한 결과가 PDSI의 경험적인 매개변수 결정 시 지역 특성이 반영되지 못하기 때문임을 밝히고 있다. 이러한 검토 결과를 바탕으로 PDSI의 경험적인 매개변수가 해당 지역의 특성을 바탕으로 자동보정 될 수 있도록 방법을 수정한 'Self-Calibrating PDSI(SC-PDSI)'를 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여 네브래스카, 캔자스, 콜로라도, 와이오밍 등 미국 내 761개 지역에 대한 가뭄분석을 수행하였으며, 이를 통해 기존 PDSI보다 일관된 가뭄 관련 모니터링 정보를 제공할 수 있음을 확인하였고 극한가뭄 및 극한습윤 상황의 발생빈도가 기존 PDSI보다 합리적인 수준으로 조정되었다는 결과를 제시하였다.

Wells et al.(2004)에 의해 제시된 SC-PDSI는 기존 PDSI의 한계를 개선한 가뭄지수라 할 수 있으나 아직까지 우리나라에서 가뭄 모니터링을 위해 이용된 사례는 없는 상황으로 가뭄감시의 정확도 향상을 위해 이에 대한 검토를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이러한 필요성에 따라 본 고에서는 SC-PDSI에 대한 방법론을 세부적으로 검토하여 소개하고 2008~2009년 가뭄 시 많은 피해가 발생했던 것으로 알려진 강원도 태백시 가뭄사례에 적용하여 우리나라 가뭄감시를 위한 SC-PDSI의 활용 가능성에 대해 제시하고자 하였다.

2. PDSI(Palmer Drought Severity Index)

Palmer(1965)는 정상적인 기후에서 현저하게 벗어난 비정상적인 습윤 부족기간을 이상 습윤 부족이라 정의하였으며, 가뭄을 장기간의 이상 습윤 부족으로 인해 나타나는 현상으로 정의하였다. 어떠한 지역에서 정상적인 기후조건을 유지하기 위해 필요한 강수량을 산정하고 이를 실제 발생한 강수량과 비교함

으로써 수분의 과잉 또는 부족을 검토하였다. 수분의 과잉이나 부족 정도를 지수로 표현함으로써 현재의 수분상황을 나타낼 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 PDSI(Palmer Drought Severity Index)라 한다. PDSI는 토양층을 상부층과 하부층으로 구분하고 토양층이 담을 수 있는 수분의 양을 결정한 후 강수량, 증발산량, 함양량, 유출량, 손실량을 고려하여 수분수지 분석(water balance analysis)을 수행하는 과정을 통해 산정되는 가뭄지수이다. PDSI는 가뭄을 정량적으로 표현하기 위해 제안된 최초의 포괄적인 가뭄지수라 할 수 있다. 가뭄을 단순히 하나의 기상인자로만 판단하려 한 것이 아니라 수문순환 과정 속에서 여러 가지 요소들의 복합적인 작용에 의한 결과로 인식하고 이를 가뭄지수 산정 과정에 고려하고자 하였다. 따라서 PDSI는 가뭄뿐만 아니라 습윤 상황을 모니터링 하기 위한 용도로도 이용될 수 있으며, 수분수지 분석을 통해 얻을 수 있는 함양량, 유출량, 토양수분량의 정보는 그 자체로서도 분석 대상 지역의 수분상황과 관련된 중요한 정보의 역할을 할 수 있다. Szep et al.(2005)은 PDSI의 산정 과정에서 얻을 수 있는 토양층의 토양수분 정보를 이용하여 토양수분에 대한 지표로서의 활용 가능성을 검토하였으며, 그 결과 충분히 이용 가능한 지표라는 결론을 내린 바 있다. 이러한 점에서 PDSI는 방법론상의 여러 가지 한계에도 불구하고 지금까지 가뭄의 모니터링 및 관리를 위해 우리나라를 비롯한 여러 국가 및 지역에서 널리 이용되고 있으며, 가뭄 정량화를 위한 새로운 가뭄지수 개발 시 적합성의 비교 기준으로 고려되고 있다.

3. SC-PDSI(Self-Calibrating PDSI)

Wells et al.(2004)은 PDSI 산정 과정에서 경험적으로 결정되는 인자를 분석 대상 지역의 기후특성을 고려하여 자동 보정할 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 기후특성 인자에 대한 방법을 수정하여 제시하였다.

3.1 가뭄지수 산정공식의 수정

Palmer(1965)에 의해 제안된 PDSI에서는 최대 가뭄지속기간에 대한 직선을 결정하고 이를 기반으로 유도된 가뭄지수 산정 공식을 가뭄기 및 습윤기에 관계없이 동일하게 적용하였다. 그러나 습윤기의 경우 가뭄기의 직선과는 다른 패턴을 나타낼 수 있으며, 이로 인해 습윤 상태에 대해 산정된 지수는 실제 상황과 다른 결과를 보일 수 있다. PDSI는 가뭄 및 습윤기간의 종료 확률을 산정하고 그에 따라 지수 산정 결과가 달라질 수 있으므로 습윤기에 대해 부정확하게 산정된 지수는 PDSI 산정 결과에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 점을 고려하여 SC-PDSI에서는 가뭄기와 습윤기에 대한 산정 공식을 분리하여 유도하였다.

Fig. 1은 Wells et al.(2004)의 연구에서 가뭄기와 습윤기에 대한 지속기간별 최대 수분편차지수의 합을 도시한 결과를 나타내고 있으며, 기울기 등에 있어 가뭄기와 습윤기 직선이 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 실제 자료에 대한 분석을 통해 이러한 결과를 확인하고 가뭄기와 습윤기에 대해 지속기간 인자(duration factor)를 분리하여 산정할 수 있도록 방법론을 수정하였다.

또한 가뭄기 및 습윤기에 대한 지속기간별 최대 수분편차지수 합의 분포를 적절히 표현할 수 있는 직선을 결정한 후 이를 이용하여 지속기간 인자를 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 의하면 식 (1)과 같이 가뭄기 및 습윤기의 직선을 나타낸 후 직선의 기울기와 절편을 이용하여 식 (2)와 같이 가뭄지수 산정 공식이 자동적으로 산정될 수 있도록 방법을 수정하였다.

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

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

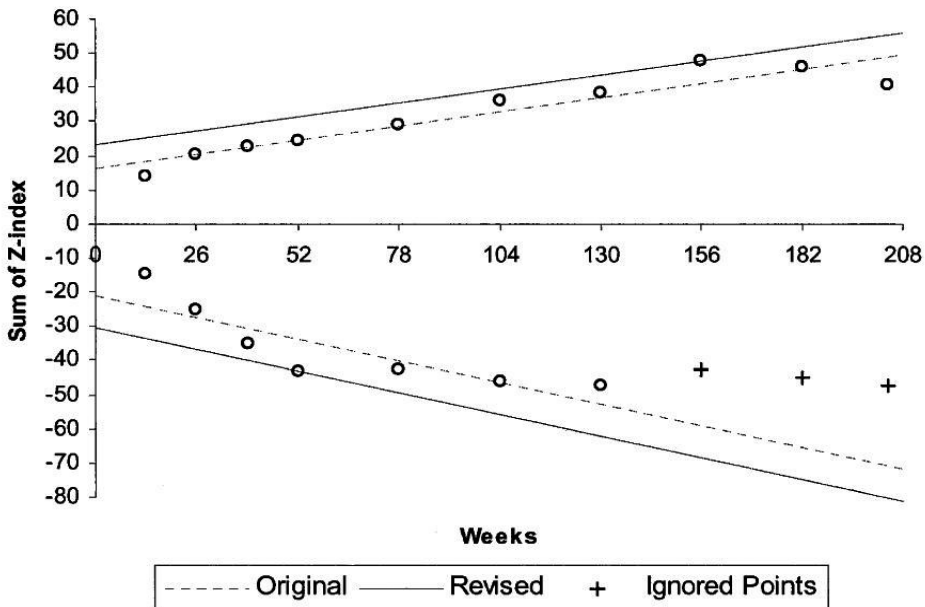


Fig. 1 최대 가뭄 및 습윤 지속기간별 $\sum Z$ (Wells 등, 2004)

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

3.2 기후특성인자 산정방법의 개선

Palmer(1965)에 의해 제안된 PDSI에서는 가뭄지수를 산정하기 위해 식 (3)과 같은 관계식을 이용하여 기후특성인자(K)를 산정하고 수분편차(d)와 함께 고려하여 수분편차지수(Z)를 산정하고 있다.

$$K_i = \frac{17.67 K'_i}{\sum_{i=1}^{12} D_i K'_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \quad (3)$$

여기서, $D_i = |\overline{P_i} - \overline{\hat{P}_i}| = |\overline{d_i}|$

$$K'_i = 1.5 \log_{10} \left[\left(\frac{\overline{PE_i} + \overline{R_i} + \overline{RO_i}}{\overline{P_i} + \overline{L_i}} + 2.8 \right) / D_i \right] + 0.5$$

그러나 식 (3)에서 '17.67'은 미국 내 9개 지역에 대한 분석결과를 토대로 도출된 경험적인 계수이며, PDSI를 적용하는 지역 또는 국가가 상이할 경우 다른 값으로 수정하여 적용될 필요가 있는 계수이다. SC-PDSI에서는 분석 대상 지역의 특성을 고려하여

지수 계산 과정에서 자동적으로 수정이 가능하도록 방법론을 개선하였다. 식 (3)에서 분모 및 분자가 나타내는 의미가 각각 관측된 값과 이론적으로 기대되는 값이라는 점에 착안하여 식 (4)와 같은 기후특성인자 산정 관계식을 제안하였다. 이때 가뭄기와 습윤기에 대한 기후특성인자를 구분하여 고려하였으며, 이를 통해 산정된 기후특성인자를 식 (3)의 K 대신 적용함으로써 가뭄지수를 산정할 수 있다.

$$K = \begin{cases} K'(-4.00 / 2nd \text{ percentile}), & \text{if } d < 0 \\ K'(+4.00 / 98th \text{ percentile}), & \text{if } d \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

4. SC-PDSI 적용 및 결과 검토

본 절에서는 앞서 살펴본 SC-PDSI를 이용하여 가뭄 모니터링에 활용할 수 있는 방안을 파악하기 위해 강원도 태백시의 2008~2009년 가뭄에 적용하고 그 결과를 검토하였다. Fig. 2는 태백 지점의 자료를 이용하여 최대 가뭄 및 습윤 지속기간별 수분편차지수 합(ΣZ)을 산정하여 도시한 것으로 가뭄기와 습윤기에 대한 값의 분포가 서로 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 결과로부터 기존 PDSI에서와 같이 가뭄기

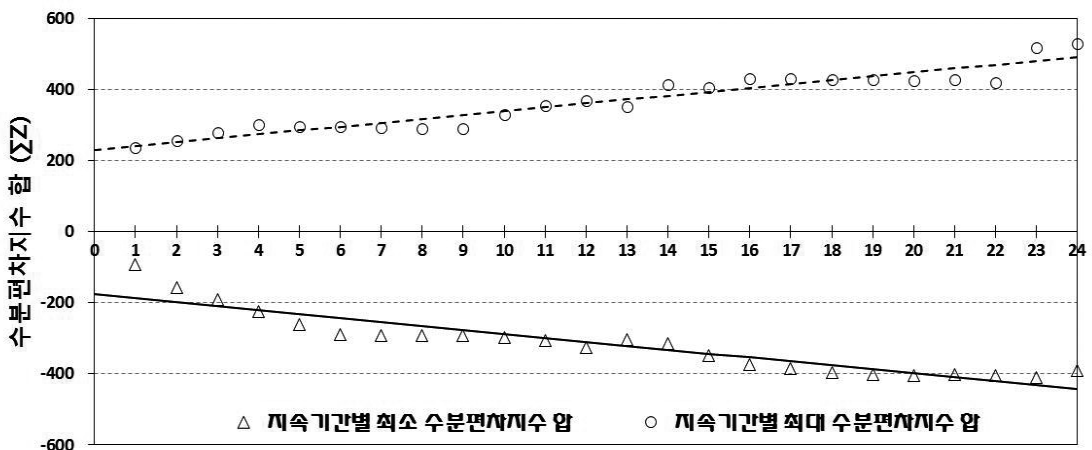


Fig. 2 태백지점의 최대 가뭄 및 습윤 지속기간별 ΣZ

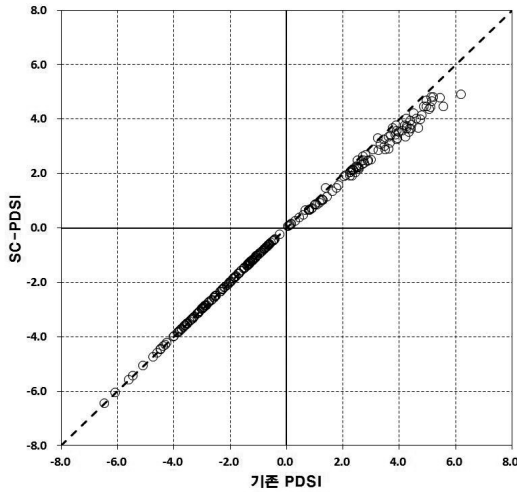


Fig. 3 태백지점에 대한 기존 PDSI와 SC-PDSI 산정 결과 비교

에 대한 지속기간별 수분편차지수 합을 산정하고 이를 가뭄기와 습윤기에 동일하게 적용할 경우 습윤기에 있어 정확하지 않은 지수가 산정될 가능성이 있으며, 가뭄기 및 습윤기 종료 확률에 따라 지수를 산정하는 PDSI의 방법론을 고려할 때 가뭄 모니터링의 신뢰도에 있어 문제가 발생할 가능성이 있다.

이와 같은 절차를 거쳐 강원도 태백 지점에 대해 기존 PDSI와 SC-PDSI를 산정한 후 비교하였다. Fig. 3은 기존 PDSI와 SC-PDSI 산정 결과를 1:1로 도시하여 나타낸 것으로 가뭄기에 대해서는 동일한 결과를 나타내고 있으나 습윤기의 경우에는 기존 PDSI에 의해 산정된 결과가 SC-PDSI에 의한 결과보다 크게 산정되는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과를 통해 앞서 언급한 바와 같이 가뭄기와 습윤기에 대해 동일한 공식을 적용하는 기존 PDSI는 습윤기에 대한 지수 산정 결과의 정확성에 한계가 있을 수 있으며, 가뭄기와 습윤기에 대한 공식을 분리하여

적용하는 SC-PDSI가 보다 정확한 습윤기 모니터링 결과를 나타낼 수 있음을 의미하는 결과라 하겠다.

Fig. 4는 2008~2009년 기간에 대해 태백 지점에 대해 산정된 SC-PDSI 시계열을 도시하여 나타낸 것이다. 비교를 위해 태백 지점에 대한 3개월 SPI와 9개월 SPI를 함께 도시하여 나타내었으며, 실제 광동댐 제한급수 시행 기간을 표시하였다. Fig. 4의 결과를 통해 가뭄지수의 전반적인 진행 패턴이 3개월 및 9개월 SPI와 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 광동댐 제한급수가 시작된 시점인 2009년 1월 이전에도 2008년 8월부터 가뭄이 상당한 수준으로 발생하였음을 확인할 수 있다. 따라서 SC-PDSI 등 가뭄지수를 이용하여 지속적인 모니터링을 수행하고 각각의 상황에 적절한 대응 조치를 마련하였을 경우 가뭄으로 인한 피해를 사전에 최소화할 수 있었을 것으로 판단되며, 이는 SC-PDSI가 가뭄 모니터링을 위한 지표로 충분히 이용 가능함을 의미하는 결과라 할 수 있다. SC-PDSI는 산정 방법에 있어 기존 PDSI의 한계를 개선한 방법으로 지역의 특성을 고려하여 산정할 수 있다는 장점이 있으며, 가뭄지수 산정 과정에서 매개변수의 자동 보정이 가능하므로 향후 가뭄 모니터링을 위한 활용 가능성이 충분하다고 판단할 수 있다.

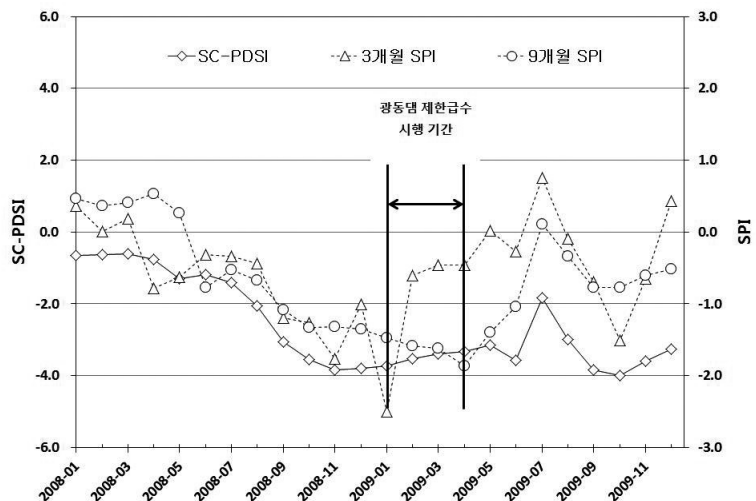


Fig. 4 2008~2009년 태백 지점 가뭄에 대한 SC-PDSI 적용 결과



5. 맺음말

일반적으로 가뭄을 모니터링 하기 위한 도구로는 다양한 가뭄지수를 이용할 수 있으며, 가뭄지수를 통해 가뭄 관련 상황을 모니터링하고 장래 가뭄 진행 양상을 예측할 수 있는 체계 구축을 위해 정부 차원에서 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 현재 우리나라에서 주로 이용되고 있는 가뭄지수는 대부분 국외에서 개발된 방법으로 방법을 적용하기에 앞서 우리나라의 기상 및 수문학적 특성을 적절히 표현할 수 있는지에 대한 검토가 필요하다. 특히 Palmer(1965)에 의해 제시된 PDSI는 유역의 물리적인 상호 작용을 기반으로 산정되는 가뭄지수라는 장점이 있으나 가뭄지수를 산정하는 과정에서 필요한 매개변수가 미국의 일부 지역을 중심으로 산정된 결과라는 한계가 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 제안된 SC-PDSI는 PDSI의 매개변수 산정 방법을 개선하여 지역의 특성을 자동으로 반영할 수 있다는 장점이 있는 방법으로 가뭄에 대한 효과적인 대응을 위해 이에 대한 활용 가능성을 검토할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 Wells et al.(2004)에 의해 제안된 SC-PDSI의 산정 방법에 대해 세부적으로 검토하였으며, 이를 우리나라 태백 지역에 적용한 후 그 결과를 검토하였다. 2008~2009년의 가뭄에 대해 적용한 결과, SC-PDSI는 가뭄을 모니터링하기 위한 목적으로 충분히 활용 가능함을 확인할 수 있었으며, PDSI의 한계를 일부 극복할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기존 PDSI가 갖는 한계를 극복하고 가뭄에 보다 효과적으로 대응하기 위한 모니터링 도구로 활용할 수 있으며, 가뭄재해에 적절히 대응할 수 있는 정책 수립 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 내용은 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원강화사업(CATER 2012-3090)의 지원으로 수행되었습니다. ☺

참고문헌

1. 국토해양부 (2010), 기후변화 대응 미래 수자원 전략.
2. 한국수자원공사(2002), 가뭄관리 종합대책 수립연구.
3. Alley, W. M.(1984), The Palmer Drought Severity Index : Limitations and assumptions, Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 23, pp. 1100~1109.
4. Karl, T. R., 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.
5. McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kieist, J.(1993), The Relationship of Drought Frequency and Duration of Time Scales, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., pp. 179~184.

6. Mo, K. C., Chelliah, M.(2006), The Modified Palmer Drought Severity Index Based on the NCEP North American Regional Reanalysis, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 45, pp. 1362~1375.
7. Palmer, W. C.(1965), *Meteorological Drought*, U.S. Dept. of Commerce Weather Bureau, Research Report No. 45.
8. Shafer, B. A., 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.
9. Szep, I. J., Mika, J., and Dunkel, Z.(2005), Palmer drought severity index as soil moisture indicator : physical interpretation, statistical behaviour and relation to global climate, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, pp. 231~243.
10. Wells, N., Goddard, S., and Hayes, M. J.(2004), A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, *Journal of Climate*, Vol. 17, pp. 2335~2351.