

엘니뇨/남방진동과 한국의 가뭄과 관계

Relationship between El Niño/Southern Oscillation and Drought in Korea

이 동 루*
Lee, Dong Ryul

Abstract

The relationship between El Niño/Southern Oscillation(ENSO) and drought in Korea is investigated using the cross correlation analysis. In this paper, Palmer Drought Severity Index(PDSI) is used as an index of drought and nine ENSO indicators are used. To obtain PDSI for Korea, the PDSI equation is derived using monthly precipitation and temperature in Korea. In addition, ENSO composite percentile analyses for PDSI, precipitation and streamflow in Korea are performed to verify the results of the cross correlation.

Results of the cross correlation show that the link between drought in Korea and ENSO is statistically significant with 6% of the variance in PDSI for Korea explained by ENSO. The PDSI is negatively correlated with the equatorial Pacific Sea Surface Temperature and the Sea Level Pressure(SLP) at Darwin leading by about 16 months. However, the relationship of the PDSI with the Southern Oscillation Index and the SLP at Tahiti is positive correlation. The ENSO composite percentile analyses show that drought, precipitation and streamflow in Korea are associated with ENSO during 6 months from December of the ENSO ending year

Keywords: El Niño, Southern Oscillation, Palmer drought severity index, drought, precipitation, streamflow, cross correlation

요 지

본 연구의 목적은 엘니뇨/남방진동(ENSO)과 한국 가뭄의 연관성을 분석하는 것이다. 이를 위하여 한국 가뭄의 지표로서 Palmer 가뭄심도지수(PDSI)와 9개 ENSO 관련 지수들에 대한 Pearson 상관분석 및 Spearman 순위상관분석이 수행되었다. 본 연구에서는 한국의 PDSI를 계산하기 위하여 우리나라의 월강수량 및 월평균기온을 이용하여 PDSI 식을 개발하였다. 또한 PDSI, 강수량 및 하천유량에 대한 ENSO 합성백분위수 분석을 통하여 교차상관분석의 결과를 검증하였다.

교차상관분석 결과 ENSO와 우리나라 가뭄은 통계적으로 ENSO가 16개월 정도 선행하는 유의적인 연관 관계가 있음을 확인하였다. 그러나 한국 가뭄의 지수인 PDSI의 총변동의 6%만 ENSO 지수의 변동에 의하여 설명되고 있어 가뭄을 ENSO 관련 지수만으로 연관시켜 예측하는 것은 어려운 것이다. ENSO의 해양성분인 적도 태평양 해수면온도와 다윈의 해면기압과 한국의 PDSI는 부(-)의 관계이고, 남방진동지수 및 타이티의 해면기압과 관계는 정(+)의 관계를 가지고 있다. 과거 발생한 ENSO 기간의 PDSI, 강수량 및 하천유량의 ENSO 합성백분위수의 분석결과 우리나라의 가뭄은 엘니뇨가 끝나는 해 12월부터 6개월 동안 평균이하의 PDSI가 지속되어 엘니뇨의 영향이 있었음을 확인하였다. 그리고 같은 기간에 강수량과 하천유량도 평균이하를 보여 가뭄의 경향을 보이고 있다.

핵심용어 : 엘니뇨, 남방진동, Palmer 가뭄심도지수, 가뭄, 강수량, 하천유량, 교차상관

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources and Environmental Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyonggi 411 410, Korea

1. 서 론

엘니뇨(El Niño)는 적도 무역풍의 약화와 동태평양과 중태평양의 해수면 온도(sea surface temperature, SST)의 상승이 특징이다. 엘니뇨는 2~7년의 불규칙한 주기로 발생하며, 전형적으로 12~18개월까지 지속된다. 엘니뇨가 발생하는 기간에는 중태평양과 남태평양 지역에서 낮은 해면기압(sea level pressure, SLP)이 발생하고, 호주, 동남아시아 및 인도양에서는 높은 SLP가 발생하는 시소(seesaw)현상이 동시에 나타난다. 이와 같은 시소현상을 남방진동(Southern Oscillation, SO)이라 한다. 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI)는 프랑스령 폴리네시아의 타이티(Tahiti)에서 관측된 SLP와 호주의 다윈(Darwin)의 SLP를 뺀 값을 표준화한 지수로서 고기압에서 저기압 지역으로 부는 무역풍의 강도를 나타낸다. 높은 SOI 즉, 큰 기압차는 무역풍이 정상상태보다 더 강해지는 라니냐(La Niña) 상황과 연관되고, 반대로 낮은 SOI 즉, 작은 기압차는 무역풍이 정상상태보다 더 약해지는 엘니뇨 상황과 연관된다. 엘니뇨/남방진동(El Niño/ Southern Oscillation, ENSO)은 엘니뇨와 라니냐 상황을 둘다 포함하는 SOI에서 관측되는 전체 변동범위를 기술하기 위하여 사용되는 용어이다. 엘니뇨는 ENSO의 온난사상(warm event or phase)의 용어로 사용되기도 하며, 반대로 라니냐는 ENSO의 한냉사상(cold event or phase)라는 용어로 사용되기도 한다(NOAA, 1997).

최근 ENSO는 세계 여러 지역에서 발생하는 가뭄과 홍수와 연관되어 있다는 연구들이 발표되고 있어 수자원 관리에서 ENSO는 가뭄과 홍수의 예측에 하나의 실마리를 제공할 수 있는 요소로 등장하고 있다. 본 연구의 목적은 ENSO와 우리나라의 가뭄과 연관성을 찾아보는 것이다. ENSO와 가뭄의 연관성 분석은 Piechota와 Dracup(1996) 및 Chiew 등(1998)의 연구에서 찾을 수 있다. 우리 나라에서 ENSO와 기온 또는 강수량간의 상관성에 관한 연구(과학기술처, 1990; 하경자, 1995; 환경부와 과학기술처, 1996; 안중배 등, 1997; 이용희, 1998, 이동률, 1998)는 다소 있었지만 가뭄과의 직접적인 분석은 없는 실정이다.

본 연구에서는 먼저 가뭄을 나타낼 수 있는 가뭄의 지수로서 Palmer 가뭄심도지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)(Palmer, 1965) 식을 우리나라의 월평균기온과 월강수량을 이용하여 개발하였다.

그리고 ENSO와 우리나라의 가뭄과 연관성을 찾기 위하여 9개 ENSO 관련 지수와 개발된 PDSI 식을 이용하여 산정된 PDSI간의 Pearson 상관분석과 Spearman 순위상관분석을 수행하였다. ENSO 관련 여러 지수를 이용한 이유는 이들 지수 중 어느 지수가 가뭄에 가장 유용한 정보를 주는 가를 파악하기 위한 것이다. 또한 Ropelewski와 Halpert(1986)가 제안한 합성백분위수(composite percentiles) 분석을 이용하여 과거 ENSO 기간의 가뭄, 강수량 및 하천유량에 대한 합성백분위수를 작성하고 ENSO에 의한 가뭄의 영향과 영향기간을 분석하였다. 그리고 가뭄 영향기간의 강수량 및 하천유량의 변동을 평가하였다.

2. 대상 자료

본 연구에 이용된 자료는 1951-1996년 사이의 한국의 월 PDSI와 9개 ENSO 관련 지수이며 PDSI 식을 유도하기 위하여 월강수량 및 월평균 기온이 이용되었다. 또한, 하천유량으로서 9개 담지점 월유입량이 이용되었다.

2.1 한국의 Palmer 가뭄심도지수(PDSI)

PDSI는 기상학적 가뭄의 지수로서 정상적인 기후상황에서 필요한(Climatically Appropriate For Existing Conditions, CAFEC) 강수량과 실제강수량의 누가편차로 나타내어진다(Palmer, 1965). PDSI 산정과정은 Palmer(1965), Karl(1983) 및 Ally(1984)에 상세히 설명되어 있고, 국내에서도 윤용남 등(1997)에 의해 적용된 바 있다.

PDSI를 산정하기 위한 입력자료는 단지, 월강수량, 월평균기온 및 유효토양수분량(available water content, AWC)으로서 매우 간단하다. 그러나, PDSI를 얻기 위해서는 사전에 증발산량(evapotranspiration, ET), 함양량(recharge, R), 유출량(runoff, RO) 및 손실량(loss, L) 그리고 잠재증발산량(potential evapotranspiration, PE), 잠재함양량(potential recharge, PR), 잠재유출량(potential runoff, PRO), 및 잠재손실량(potential loss, PL)을 월물수지계산 모형(monthly water balance accounting model)을 이용하여 계산해야 한다. 이들 계산된 자료를 이용하여 CAFEC 강수량(\hat{P})를 산정하기 위해서는 우리나라의 기후특성에 맞는 증발산량 계수(α), 함양량 계수(β), 유출량 계수(γ) 및 손실량 계수(δ)를 산정해야 하며, 12개월의 각 월에 대한 계수는 식 (1), (2), (3)

및 (4)와 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \overline{ET_i} / \overline{PE_i} \quad (1)$$

$$\beta_i = \overline{R_i} / \overline{PR_i} \quad (2)$$

$$\gamma_i = \overline{RO_i} / \overline{PRO_i} \quad (3)$$

$$\delta_i = \overline{L_i} / \overline{PL_i} \quad (4)$$

여기서 $i(=1,2,\dots,12)$ 는 월, 윗줄은 각 성분의 월평균을 나타낸다.

CAFEC 강수량(\hat{P})은 α, β, γ 및 δ 를 이용하여 식 (5), (6), (7) 및 (8)로 정의되는 CAFEC 증발산량(\widehat{ET}), 함양량(\widehat{R}), 유출량(\widehat{RO}) 및 손실량(\widehat{L})을 이용하여 식 (9)와 같이 구한다.

$$\widehat{ET}_i = \alpha_i PE_i \quad (5)$$

$$\widehat{R}_i = \beta_i PR_i \quad (6)$$

$$\widehat{RO}_i = \gamma_i PRO_i \quad (7)$$

$$\widehat{L}_i = \delta_i PL_i \quad (8)$$

$$\widehat{P}_i = \widehat{ET}_i + \widehat{R}_i + \widehat{RO}_i - \widehat{L}_i \quad (9)$$

월 PDSI 산정을 위하여 해당 월의 실제 강수량(P)과 CAFEC 강수량(\widehat{P})의 차(d)가 식 (10)과 같이 계산된다.

$$d_i = P_i - \widehat{P}_i \quad (10)$$

가뭄의 강도는 기후의 함수이므로 건조지역과 습윤 지역 간 또는 여름과 겨울의 가뭄 특성이 서로 상이한 강도로 나타난다. 따라서 Palmer(1965)는 시공간적으로 PDSI를 상대적으로 비교할 수 있는 표준화된 지수를 개발하기 위하여 식 (11)과 같이 d 에 기후적인 가중인자(K)를 도입하였다.

$$Z_i = d_i K_i \quad (11)$$

여기서 Z 는 습윤편차지수 또는 이상습윤지수(moisture anomaly index)라 한다. K 는 PDSI가 계산되기 전에 해당 지역의 기후자료로부터 결정된다. 식 (11)의 Z 가 음(-)이 지속되면 가뭄 상황이고, 양(+)이 지속되면 수분이 풍부한 풍수 상황이라 할 수 있다. Plamer(1965)는 미국대륙의 10개 지역의 Z 를 이용하여 K 를 구하였으며, 최종적으로 누가이상습윤지수를 이용하여 식 (12)의 PDSI의 계산식을 제시하였다.

$$X_i = 0.897X_{i-1} + Z_i/3 \quad (12)$$

여기서 X_i 는 PDSI이다. 미국지역의 강수량 등 수문변량의 단위들은 영국단위제를 이용하기 때문에 이상습윤지수(Z)의 단위는 inch로 하고 있다. X_i 에 따른 가뭄 및 홍수의 분류는 표 1과 같다.

본 연구에서는 Palmer(1965)의 PDSI 산정과정에 따라 한국의 기후조건들을 적용한 식 (12)의 PDSI 식을 다음과 같이 유도하였다. PDSI는 공간적인 가뭄과 계절적인 가뭄을 상대적으로 비교할 수 있는 표준화된 지수이다. 따라서 PDSI 계산시 시간적으로 동일한 기간의 자료에 의한 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 및 K 의 매개변수 추정이 필요하다. 본 연구에서는 그림 1의 9개 관측소의 1967-1996년의 30년간 월강수량과 월평균기온을 이용하여 PDSI 산정에 필요한 매개변수들을 구한 후, 이들을 이용하여 1951-1996년의 PDSI를 얻었다. 윤용남 등(1997) 역시 우리나라의 가뭄을 분석하기 위하여 PDSI 식을 유도하였다. 이들의 결과와 본 연구와 다른 점은 매개변수 산정과정에 동일기간의 30년 자료를 이용함으로써 매개변수의 지역화를 했다는 점과 이때 자료의 이용기간에 심각한 가뭄이 있었던 1995년과 1996년이 포함됐다는 것이다.

표 1. 가뭄과 홍수 상황을 나타내는 PDSI의 분류 (Jones, 1984)

X	분 류
≥ 4.00	홍 수
2.00 to 4.00	풍 수
-2.00 to 2.00	정 상
-2.00 to -4.00	건 조
≤ -4.00	가 뭄



그림 1. PDSI 개발에 이용된 관측지점

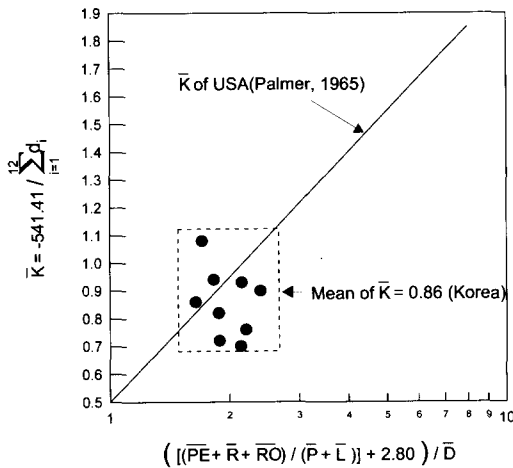


그림 2. 미국대륙과 한국의 기후가중치(K)의 비교

그림 2는 한국의 9개 지점에서 산정된 K 를 Palmer(1965)가 미국대륙에서 산정한 K 의 회귀곡선에 같이 나타낸 것이다. K 는 건조지역에서는 크고, 습한 지역에서는 작은 경향이 있다. 우리나라의 K 값은 습한 기후지역의 K 값을 보이고 있으며 평균 0.86이다. 그리고 지역간의 편차는 있으나 각 월간의 편차는 거의 없는 것으로 나타났다.

최종적인 한국의 PDSI를 개발하기 위하여 먼저 해당 지점으로부터 설정된 기간동안 음(-)의 최대누가 이상습윤지수(Z)의 평균을 결정한다. 한국의 9개 지

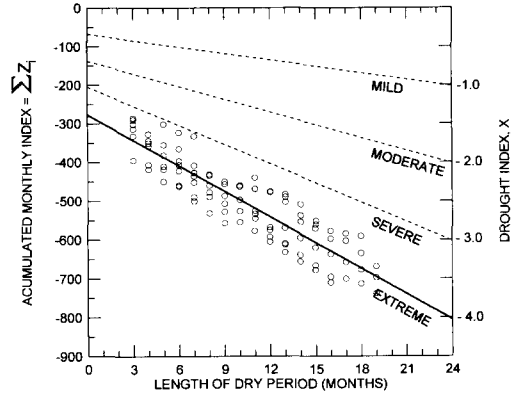


그림 3. 설정된 기간동안의 누가 이상습윤지수

점에서 얻은 이들 값은 그림 3과 같으며 실선은 최소자승법(least-square method)에 의해 작성된 것이다. 이 실선은 최대가뭄선(extreme drought line)이며 Palmer(1965)는 이 최대가뭄선에 PDSI=-4의 수치적 가뭄심도 값을 부여하였다. 그리고 최대가뭄과 누가 Z 가 0인 사이를 3개선으로 균등 분할하여 PDSI=-3에 심한 가뭄(severe drought), PDSI=-2에 보통가뭄(moderate drought), PDSI=-1에 경미한 가뭄(mild drought)이라고 임의로 정의하였다.

그림 3의 최대가뭄선의 방정식은 식 (13)과 같다.

$$X_i = \left(\sum_{j=1}^i Z_j \right) / (5.503t + 69.361) \quad (13)$$

여기서 X_i 는 i 월의 가뭄심도지수, $\sum_{j=1}^i Z_j$ 는 t 개월 동안 누가이상습윤지수이다. 식 (13)을 이용하여 최종적으로 본 연구에서 유도된 한국의 PDSI 식은 식 (14)와 같다.

$$X_i = 0.926X_{i-1} + Z_i/74.819 \quad (14)$$

여기서 X_i 는 i 개월의 PDSI, Z_i 는 이상습윤지수로서 단위는 mm이다. 윤용남 등(1997)이 제시한 식 (14)과 같은 PDSI 식에서는 이상습윤지수의 단위가 inch로 되어 있다. 식 (14)을 이용하여 그림 1의 9개 지점의 PDSI를 구한 후, 이들 지점의 PDSI를 평균하여 한국의 PDSI 시계열을 작성하였다. 그림 4는 한국의 PDSI로서 우리나라에서 전국적인 가뭄이었던 1967~1968년, 1977~1978년 및 1994~1996년의 가뭄이 -4 이하의 PDSI를 보여 과거 가뭄현상을 잘 나

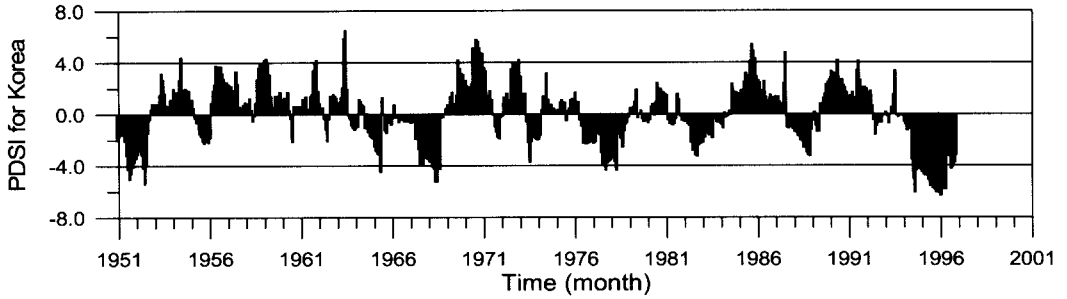


그림 4. 한국의 Palmer 가뭄심도지수

타내주고 있으며, 1960년대부터 약 6~8년의 주기로 건조 및 가뭄이 발생하고 있다.

2.2 ENSO 관련 지수

ENSO는 해양의 SST와 대기의 SLP의 이상변화에 의해서 파악된다. SST를 관측하는 대표지역은 그림 5와 같이 Niño1+2(0°-10°S, 90°W-80°W), Niño3(5°N-5°S, 150°W-90°W), Niño4(5°N-5°S, 160°E-150°W), Niño3.4(5°N-5°S, 170°W-120°W), Ship track1 및 Ship track6의 6개 지역이다. Ship track1은 중앙 및 남아메리카의 해안, Ship track6은 칸톤(Canton)섬 부근의 적도를 통과한다(Rasmusson과 Carpenter, 1982). 관측된 SST는 월단위로 정리되고 있으며, 각 월의 SST에서 예년 월평균(일반적으로 30년 평균)을 감하여 작성된 SST 편차시계열(anomaly time series) 즉, SST 지수로부터 ENSO의 발생을 파악한다. Trenberth (1997)는 Niño3.4

지역에서 관측된 SST 지수의 5개월 이동평균이 6개월 동안 +0.4°C 및 -0.4°C를 초과할 때를 각각 엘니뇨 및 라니냐로 구분하였다.

그리고 SLP를 관측하는 대표적인 지역은 호주의 다윈과 중태평양과 남태평양을 대표하는 타이티이다. 남방진동에 관련된 지수는 다윈과 타이티에서 관측된 각 SLP 편차시계열과 타이티에서 다윈의 SLP를 뺀 값(SO)을 이용하여 구한 표준화 지수 즉, 남방진동지수(SOI)가 있다. Kiladis와 Diaz(1989)는 SOI가 1년을 3개월씩 구분한 4계절에서 3계절 연속기간의 값이 -1.0이하 및 +1.0이상일 때를 각각 엘니뇨 및 라니냐로 구분하였다. Glantz(1996)는 엘니뇨가 발생할 때 ENSO의 해양성분인 SST 지수와 대기성분인 SOI는 완전한 일대일 상관관계는 없지만 매우 강한 상관성을 보여주고 있다고 기술하고 있다.

본 연구에서 이용한 ENSO 관련 지수는 위에서 기술한 해양의 6개 SST와 대기의 타이티와 다윈의

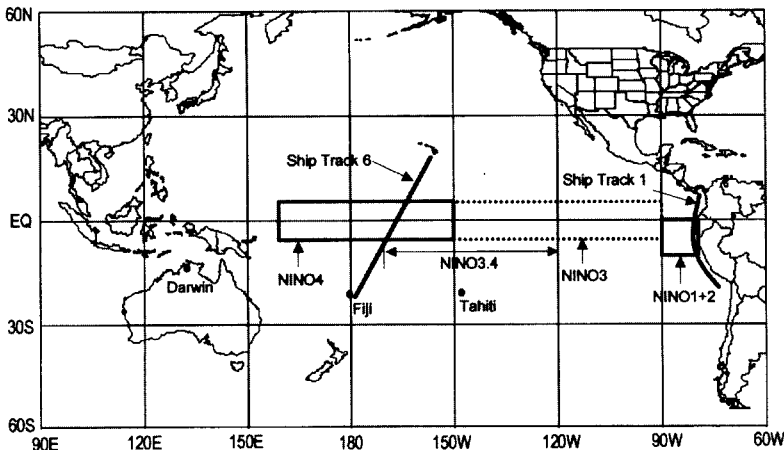


그림 5. ENSO 관련 지수 관측지역

표 2. 하천유량자료

댐유입량	자료기간	댐유입량	자료기간
소양댐	1974~1996	남강댐	1976~1996
충주댐	1956~1996	대청댐	1958~1996
안동댐	1954~1996	섬진강댐	1966~1996
임하댐	1969~1996	주암댐	1970~1996
합천댐	1963~1996		

SLP 및 SOI를 이용하였다. 이용 자료기간은 1951~1996년으로서 미국의 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC, 1997)에서 구하였다.

2.3 하천유량

본 연구에서 이용한 하천유량 자료는 인공적인 유량 조절이 거의 없는 9개 댐지점의 월유입량 자료로서 댐 지점과 이용자료 기간은 표 2와 같다.

3. 분석 방법

ENSO와 한국 가뭄의 연관성을 찾기 위하여 Pearson 상관분석과 Spearman 순위상관분석을 수행하였다. Pearson 상관분석은 평균과 표준편차를 이용하는 모수적 상관분석(parametric correlation analysis)으로서 두 변수간의 선형연관성을 평가하는 선형상관계수를 산정한다. 반면에 Spearman 순위상관 분석은 비모수적 상관분석(nonparametric correlation analysis)으로서 비선형 단조연관(nonlinear monotonic association)의 평가에 적절하며, 이상치(outlier)의 영향을 제거할 수 있는 장점이 있다. 따라서 만약 두 변수의 관계가 비선형이고 자료에 이상치가 있다면 Pearson 상관계수의 이용은 부적절하다. 또한 두 변수가 비선형 단조연관(monotonic association)을 가지고 있다면 순위상관계수가 Pearson 상관계수가 더 크나 선형관계가 있다면 반대로 나타난다(Helsel과 Hirsch, 1992). 본 연구에서는 ENSO 관련 지수와 한국의 PDSI의 관계가 불확실하므로 두 가지 방법을 모두 이용하였다.

마지막으로 과거에 발생한 엘니뇨와 라니냐 연도를 기준으로 한국의 PDSI, 강수량 및 하천유량에 대한 36개월 ENSO 합성백분위수를 작성하여 엘니뇨와 라니냐의 발생 전후의 가뭄의 영향을 분석하였다.

3.1 교차상관함수

X_t 와 Y_t 의 두 시계열 사이의 Pearson lag-k

교차상관계수 r_k 는 식 (15)에서 구한다.

$$r_k = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} \left(\frac{X_t - \bar{X}_t}{S_{X_t}} \right) \cdot \left(\frac{Y_{t+k} - \bar{Y}_{t+k}}{S_{Y_{t+k}}} \right) \quad (15)$$

여기서 \bar{X}_t 와 \bar{Y}_{t+k} 및 S_{X_t} 와 $S_{Y_{t+k}}$ 는 t 와 $t+k$ 기간의 각 자료계열의 평균과 표준편차이다. 본 연구에서는 X_t 는 ENSO 관련 지수, Y_{t+k} 는 한국의 PDSI로 하였다.

Spearman 순위상관함수는 식 (16)과 같다. lag-k의 교차순위상관계수는 각 ENSO 관련 지수(X_i)와 k 만큼 지체한 한국의 PDSI($Y_i = Y_{t+k}$)에 대한 순위를 산정하여 구하였다.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{X_i} \cdot R_{Y_i}) - n \cdot \left(\frac{n+1}{2} \right)^2}{n(n^2-1)/12} \quad (16)$$

여기서 R_{X_i} 와 R_{Y_i} 는 X_i 와 Y_i 의 순위이며, n 은 자료수이다.

3.2 ENSO 합성백분위수 분석

ENSO 합성백분위수 분석은 ENSO 영향의 공간적 범위, 크기 및 기간을 효율적으로 파악할 수 있는 기법으로 Ropelewski와 Halpert(1986)에 의해 제시되었다. 합성백분위수를 작성하기 위하여 먼저 해당 자료 시계열의 각 월 자료를 백분위수(percentile rank)로 나타낸다. 예로, n 년 월 PDSI가 있는 경우, 먼저 각 월자료에 대하여 오름차순으로 정렬하고 해당 자료치에 순위를 부여한다. 즉, 오름차순으로 정렬된 첫 번째 자료에 1부터 마지막 자료에는 n 을 부여한다. 그리고 부여된 순위를 표준화하기 위하여 각 순위를 기록년수 즉, n 으로 나눈 다음 100을 곱함으로써 백분위수를 구한다. 또한, 이들 각 백분위수를 해당 원자료에 부여하여 표준화된 백분위수 시계열을 최종적으로 작성한다.

ENSO 합성백분위수는 백분위수로 표준화된 시계열에서 과거 발생한 각 ENSO 사상(엘니뇨 및 라니냐)을 기초로 작성한다. 36개월 합성백분위수는 ENSO 사상이 발생한 전 연도의 7월부터 시작한다. 따라서, 36개월 합성백분위수는 ENSO가 발생한 전년도 6개월, 발생 년도 12개월, 발생 다음해 12개월 및 그 다음해 6개월로 구성되고, 각 기간에 (-1), (0), (+1) 및

(+2)의 기호를 부여한다. 즉, (-1)은 엘니뇨 발생 전년, (0)은 발생년, (+1)은 발생 다음해 및 (+2)는 그 다음해를 표시한다. ENSO의 유의적인 영향기간은 36개월 합성백분위수로부터 같은 부호의 편차가 5개월 또는 그 이상 갖는 기간으로 선정된다(Kahya와 Dracup, 1993). 합성백분위수의 최종분석은 선정된 영향기간을 엘니뇨와 라니냐가 발생하지 않은 연도와 비교하여 영향의 일관성을 검토하는 것이다. 합성백분위수에 대한 좀더 상세한 내용과 절차는 이 기법을 이용하여 우리나라의 기온과 강수량에 대한 ENSO의 영향을 분석한 이동률(1998)의 논문을 참고하기 바란다.

본 연구에서는 한국의 PDSI에 대한 ENSO 합성백분위수 분석뿐만 아니라 강수량 및 하천유량에 대한 분석도 함께 분석하여 이들 수문변수들의 상호연관성을 조사하였다. 또한, 이들 결과를 교차상관분석의 결과와 비교 검토하였다.

4. 분석 결과

4.1 교차상관계수

한국의 가뭄과 ENSO 관련 지수와 상관성을 찾기 위하여 사용된 자료는 한국의 PDSI와 ENSO의 해양성분인 Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4, Ship track1 및 Ship track6 지역의 6개 SST 표준화 지수, 3개의 대기성분 즉, 다윈 및 타이티의 SLP의 표준화 지수와 타이티에서 다윈의 SLP를 뺀 차를 표준화한 지수(SOI)이다.

표 3은 교차상관분석 결과로 최대 상관계수와 이때의 지체시간 lag-k를 제시한 것이다. Pearson 교차상관계수에서 페루연안의 Niño1+2 및 Ship track1의 SST는 한국의 가뭄과 통계적으로 유의적인 관계가

나타나지 않았다. 그러나 이외의 ENSO 관련 지수는 99% 유의수준에서 통계적인 연관성을 보여주고 있다. 상관계수의 절대치 범위는 0.18~0.25로서 모든 SST 지수 및 다윈의 SLP와 한국의 PDSI는 부(-)의 관계를 보여주고 있고, SOI와 타이티의 SLP와는 정(+)의 관계를 보여주고 있다. ENSO 관련 지수 중 한국의 가뭄에 가장 큰 상관계수를 가지고 있는 것은 SOI, Niño4 및 Ship track6 지역의 SST이다. 그리고 한국의 가뭄은 ENSO 관련 지수들과 13~19개월 지체되어 최대 상관성을 가지고 있다.

Spearman 순위교차상관분석의 최대상관계수는 Pearson 교차상관계수보다 약간 크게 나타났으나 뚜렷한 차이는 없으며, lag-k는 비슷한 시기에 나타났다. 95% 유의수준에서 9개 ENSO 관련 지수 모두 한국의 가뭄에 연관되는 것으로 나타났으나, 99% 유의수준에서는 페루연안의 Niño1+2 및 Ship track1의 SST가 연관성이 없는 것으로 나타났다. 또한 Pearson 상관계수와 같이 각 지수들과 한국의 가뭄에 대한 정(+)과 부(-)의 관계 및 가장 큰 상관성을 갖는 지수는 동일하게 나타났다.

이상의 결과는 ENSO 관련 지수와 한국의 가뭄의 통계적인 연관성이 있음을 보여준다. 그러나 한국의 가뭄을 각 ENSO 관련 지수를 이용하여 예측하는 것은 너무 작은 상관계수 때문에 어려울 것 같다. 예를 들어 교차상관분석에서 얻은 최대상관계수는 0.25인데 이를 제곱한 결정계수(coefficient of determination)로 환산하면 0.06이다. 이는 한국 가뭄의 지수인 PDSI의 총변동의 6%만 ENSO 관련 지수의 변동에 의하여 설명되고, 94%는 ENSO 관련 지수 이외의 요소로 설명된다는 것을 의미한다. 따라서 각 ENSO 관련 지수에 의한 한국의 가뭄예측은 어려울 것이다.

표 3. ENSO 관련 지수와 한국의 PDSI의 상관분석의 결과

ENSO 관련지수	Pearson 상관분석		Spearman 순위상관분석	
	상관계수(최대치)	lag-k	상관계수(최대치)	lag-k
Tahiti	0.175**	19	0.200**	19
Darwin	-0.196**	13	-0.210**	13
SOI	0.210**	16	0.223**	13
Niño1+2	-0.053	14	-0.085*	15
Niño3	-0.137**	14	-0.160**	14
Niño4	-0.223**	18	-0.231**	16
Niño3.4	0.181**	18	0.207**	19
Ship track1	-0.048	14	-0.086*	16
Ship track6	-0.235**	16	-0.237**	16

* 95% 유의수준 : + 0.083, ** 99% 유의수준 : + 0.110

4.2 PDSI, 강수량 및 하천유량에 대한 ENSO 합성백분위수

그림 6은 PDSI, 강수량 및 하천유량을 백분위수로 표준화한 시계열에서 1954년부터 발생한 11개 엘니뇨(1957, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976, 1979, 1982, 1986, 1991, 1994) 및 7개 라니냐(1956, 1964, 1970, 1973, 1974, 1984, 1988) 사상을 추출하여 각 월을 평균한 36개월 합성백분위수를 작성한 것이다. 그림 6(a)는 엘니뇨가 발생하는 해의 PDSI 백분율은 50번째 백분위수보다 5개월 이상 연속적으로 크고 소멸 해부터는 반대로 작은 가뭄상황을 보여주고 있으며, 1월(+2)~6월(+2)기간에 가장 큰 영향이 나타나고 있다. 반면 라니냐는 엘니뇨와 반대인 풍수상황을 같은 기간에 보여주고 있다. 이들 결과는 엘니뇨 및 라니냐가 발생한 후 16개월 전후에 영향이 가장 크게 나타나는 것을 보여주고 있어 교차상관분석에 의한 연관 정도의 통계적 유의성을 확인해 주고 있다. 그림 6(b)와 6(c)는 강수량과 하천유량의 결과로서 PDSI가 엘니뇨와 라니냐의 영향이 가장 큰 기간에 각각 과우 및 갈수,

다우 및 풍수를 잘 보여주고 있다.

그림 7은 그림 6(a)에서 ENSO에 의한 가뭄의 가장 큰 영향으로 선정된 1월(+2)~6월(+2)기간의 영향의 일관성을 분석하기 위하여 1954~1996년 기간동안 매년 같은 영향기간의 백분위수를 평균하여 작성한 지수 시계열이다. 일관성의 분석은 지수시계열에서 엘니뇨 및 라니냐에 의한 영향기간의 과거 PDSI가 평균 이상 또는 이하로 나타나는 비율을 평가하는 것이다. 그림 7(a) PDSI의 1월(+2)~6월(+6)기간의 백분위를 평균하여 연도별로 도시한 것으로 검은 막대 그래프는 엘니뇨의 영향을 나타내고, 11개 엘니뇨 사상에서 9개 사상이 평균보다 작은 PDSI 백분위를 보여주고 있다. 따라서 평균 이하를 기록한 엘니뇨 영향은 82%로 강한 일관성을 보여주고 있다. 그림 7(b)에서 검은 막대 그래프는 라니냐의 영향을 나타낸다. 라니냐에 의한 PDSI의 영향기간의 지수시계열로서 7개 사상 중 6개가 평균 이상으로 나타나 86%의 일관성을 보여주고 있다. 그림 7(a), 7(b)에 제시된 점선은 Weibull공식에 의해 지수 시계열의 PDSI 백분위를 빈도분석한 10년 빈도의 이상기후를 나타내는 상·하한치이다. 이들

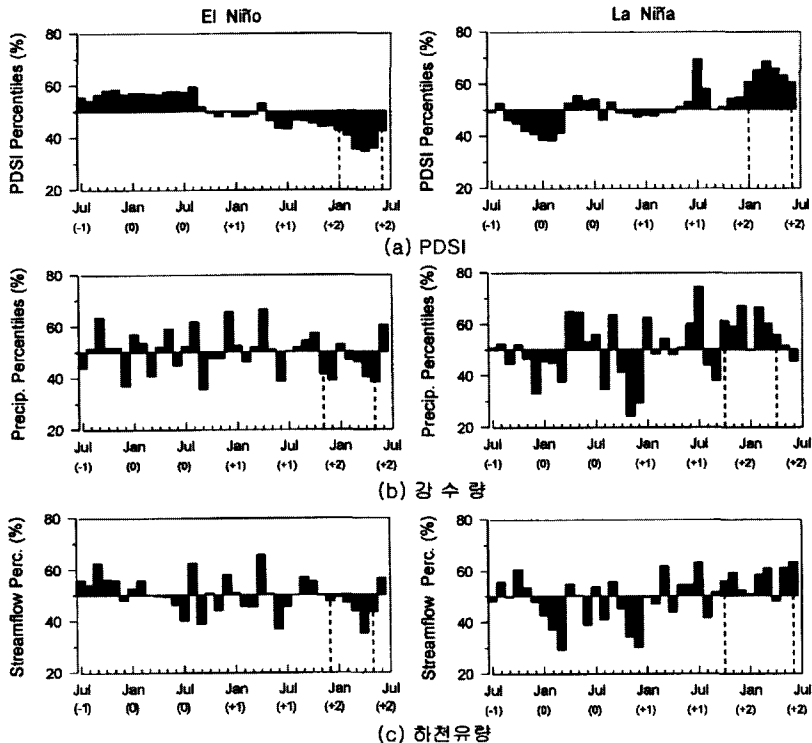


그림 6. ENSO 기간의 36개월 합성백분위수

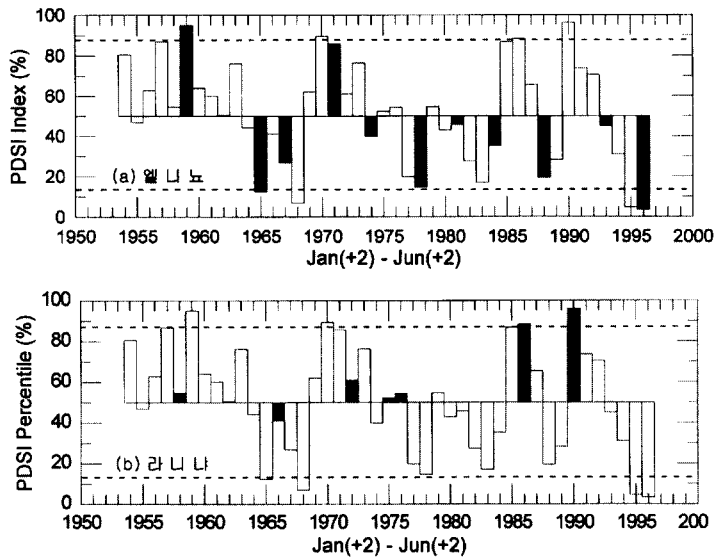


그림 7. PDSI에 대한 ENSO의 영향이 가장 큰 기간의 연도별 지수시계열

상·하한치 초과하는 4개의 사상 중 엘니뇨와 라니냐의 영향은 각각 2개씩 나타나 과거에 발생한 이상 가뭄 및 풍수에 50%는 ENSO의 영향이 있었음을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구의 목적은 ENSO와 한국 가뭄과 상관성을 찾는 것이다. 이를 위하여 먼저 가뭄의 지수로서 우리나라의 기후 특성에 맞는 PDSI 식을 유도하였다. 개발된 PDSI 식을 이용하여 산정된 PDSI와 9개 ENSO 관련 지수간의 Pearson 교차상관분석과 Spearman 순위상관분석을 수행하였으며, 이를 통하여 ENSO와 연관정도 및 ENSO 관련 지수 중 어느 지수가 한국의 가뭄과 가장 큰 연관성이 있는가를 파악하였다. 또한 과거 엘니뇨 및 라니냐 기간의 가뭄, 강수량 및 하천유량에 대한 합성백분위수를 분석하여 ENSO에 의한 가뭄의 영향 및 영향기간을 파악하였다. 이상의 연구로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 유도된 PDSI 산정식은 과거 우리나라의 전국적인 가뭄을 잘 나타내 주고 있다.

(2) 한국의 PDSI와 ENSO 관련 지수의 교차상관분석 결과 ENSO 관련 지수에 13~19개월 지체되어 통계적인 유의성을 가지고 있는 관계를 얻었다. 이때 상관계수는 99% 유의 수준을 초과하는 0.14~0.24로 나타났다. 또한 6개 SST 지수들과 다윈의 SLP는 우

리나라의 가뭄과 부(-)의 관계이며, SOI 및 타이티의 SLP와는 정(+)의 관계로 나타났다. 또한 SOI, Niño4와 Ship track6 지역의 SST가 한국의 가뭄과 가장 큰 연관성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 그러나 최대상관계수 0.25를 기준으로 산정한 결정계수 0.06으로 볼 때, 한국 가뭄의 지수인 PDSI의 총변동의 6%만 ENSO 관련 지수의 변동에 의하여 설명되고, 94%는 ENSO 관련 지수 이외의 요소로 설명된다. 따라서 한국의 가뭄을 ENSO 관련 지수만으로 연관시켜 예측하는 것은 어려울 것이다.

(3) ENSO 관련 지수와 한국의 PDSI간의 교차상관분석에서 Pearson 상관분석과 Spearman 순위상관분석에 의한 결과에서는 뚜렷한 차이점을 찾을 수 없었다.

(4) 과거 ENSO 사상에 대한 PDSI, 강수량 및 하천유량의 합성백분위수의 분석에서 ENSO가 발생한 후 교차상관분석의 결과와 같이 16개월 전후에 유의적인 영향이 있는 것을 확인하였다. 또한 엘니뇨에 의한 우리나라의 가뭄의 영향은 1월(+2)~6월(+2)기간에 나타났으며, 라니냐에 의한 풍수의 영향도 같은 기간에 나타났다. 그리고 이 영향기간에서 과거 11개 엘니뇨 중 9개(82%)가 가뭄과 연관되었으며, 7개 라니냐 사상 중 6개(86%)가 풍수에 연관성이 있었음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단과 한국건설기술연구원의 지원으로 콜로라도 주립대학 토목공학에서 박사후 과정 동안 수행한 연구로서 지원에 감사드립니다. 또한, 보다 충실한 논문이 되도록 원고수정을 해주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

참고 문헌

- 과학기술처 (1990). 한반도 기후변화 감시 및 이상 기상에 관한 연구 (1). 중앙기상대 기상연구소.
- 안중배, 류정희, 조익현, 박주영, 류상범 (1997). “한반도 기온 및 강수량과 적도 태평양 해면 온도와의 상관관계에 관한 연구.” 한국기상학회지, 한국기상학회, 제33권 제3호, pp. 487-495.
- 윤용남, 안재현, 이동률(1997). “Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 317-326.
- 이동률 (1998), “엘니뇨 및 라니냐와 한국의 기온 및 강수량 관계.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 805-817.
- 이용희 (1998). “남방진동지수와 한반도 강수량과의 관련성.” Climate Bulletin, 기상연구소, Vol. 3 No. 1, 엘니뇨/라니냐 특집호, pp. 1-2.
- 하경자 (1995). “겨울철 서울 기온의 경년변동과 태평양 해면온도와의 상관성 연구.” 한국기상학회지, 한국기상학회, 제31권, 제4호, pp. 313-323.
- 환경부, 과학기술처 (1996). 지구규모 대기환경 기초 및 기반기술(기후변화 예측기술). 연세대학교 지구환경연구소.
- Climate Prediction Center (1997). “Data: Current monthly atmospheric and SST index values.” <http://nic.fb4.noaa.gov/data/cddb>.
- Chiew, F.H.S., Piechota, T.C. Dracup, J.A. and McMahon, T.A. (1998). “El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting.” *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 138-149.
- Glantz, M.H. (1996). Currents of change: *El Niño's impact* on climate and society. Cambridge University Press, Cambridge.
- Helsel, D.R., and Hirsch, R.M. (1992).

- Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier, pp. 209-220.
- Jones, K.H. (1984). *An Evaluation of the Palmer Drought Index in Southern Saskatchewan*. Report No. CSS-R84-01, Scientific Services Regina, Saskatchewan.
- Kahya, E., and Dracup, J.A. (1993). “U.S. streamflow patterns in relation to the El Niño/Southern Oscillation.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, 2491-2503.
- Kiladis, G.N. and Diaz, H.F. (1989). “Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation.” *Journal of Climate*, Vol. 2, No. 9, 1069-1090.
- NOAA (1997), “Definitions of El Niño, La Niña, and ENSO.” <http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/ensodefs.html>.
- Palmer, W.C.(1965). *Meteorological drought*. Research Paper 45, Weather Bureau, Washington, D.C.
- Piechota, T.C., and Dracup, J.A. (1996). “Drought and regional hydrologic variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern Oscillation.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 5, pp. 1359-1373.
- Trenberth, K.E. (1997). “The definition of El Niño.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, No. 12, pp. 2771-2777.
- Rasmusson, E.M., and Carpenter, T.H. (1982). “Variation in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño.” *Monthly Weather Review*, Vol. 110, No. 5, pp. 354-384.
- Ropelewski, C.F., and Halpert, M.S. (1986). “North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO).” *Monthly Weather Review*, Vol. 114, No. 12, pp. 2352-2362.
- (논문번호:98-070/접수:1998.11.11/심사완료:1999.01.27)