

가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구 :

1. 마코프연쇄를 이용한 PDSI의 추계학적 거동분석

A Study on the Hydrologic Decision-Making for Drought Management :

1. An Analysis on the Stochastic Behavior of PDSI using markov chain

강인주* / 윤용남**

Kang In Joo / Yoon Yong Nam

Abstract

The purposes of this study are to perform the management and monitoring of droughts for Mokpo area via the monthly Palmer index(PDSI), the data is obtained from the Mokpo meteorological station, and the used data are in the period of 1906 to 1999. Monthly Palmer index is classified into 7 stochastic classes and its dynamic change of monthly transition probability estimated by Markov chain is investigated. We also estimate the steady state probability of the classified PDSI. The 4th class shows the highest frequency of 49.6% out of 7 classes and the 7th class which is the most extreme drought show that a stochastic transition probability is more or less larger than an empirical one. Also, we found that the monthly steady state probability could be used for the forecasting of changing pattern of drought magnitude for the study area.

keywords : PDSI, drought, markov chain

요 지

본 연구에서는 월 Palmer 가뭄심도지수(PDSI)를 산정하여 목표지역을 중심으로 가뭄 관리 및 감시를 수행하고자 하였으며, 이에 이용한 자료는 1906년부터 1999년까지 94개년의 목포기상대 자료를 이용하였다. 월 Palmer 지수를 7개의 추계학적 등급으로 분류하고 마코프연쇄(markov chain)를 이용해 월전이확률을 산정함으로써 동적인 확률변화를 살펴보고자 하였으며, 가뭄의 정상상태확률 또한 산정하였다. 본 연구를 통하여 전체 7등급 중 가장 자주 발생하는 등급은 4등급으로 약 49.6%의 발생횟수를 기록하였으며 가장 극심한 7등급의 가뭄에서는 경험적 확률보다 추계학적 분석 확률이 다소 커지는 경향을 나타내었다. 또한, 월 정상상태확률은 장래 대상지역의 가뭄의 크기 변화 양상을 예측하는데 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 팔머가뭄심도지수, 가뭄, 마코프연쇄

* (주)대경 ENC 전무이사

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

1. 서론

가뭄은 인간이 극복하기 힘든 자연재해로서 지역경제를 어렵게 할 뿐 아니라 자연 생태계까지 파괴하기 때문에 전 세계적으로 가장 두려워하는 주요 관심 재해 중 하나이며 인구증가, 도시화, 산업화 등으로 인하여 용수수요가 증가할수록 더욱 극복하기 어려운 문제이다(최영진, 1995).

현재까지 가뭄에 대한 대책은 중앙정부에서 한시적으로 가뭄대책상황실을 설치, 운영하고 가뭄의 정도에 따라 가뭄지역에 긴급 예산편성 및 지원과 가뭄대책 특별지시로 일관하였고, 중앙정부 지시에 의하여 지방자치단체에서 전시적인 가뭄의 대책을 수행하여 왔었다. 그 대책으로는 제한급수, 급수차 및 선박 등을 이용한 비상급수, 관정개발, 절수운동, 가뭄홍보 등이 주를 이루었고 가뭄이 끝나면 잊어버리는 응급대책으로 일관하여 왔기 때문에 가뭄의 피해는 반복될 수밖에 없었다(농림부, 1995; 행정자치부, 1998).

또한, 현재까지 대부분의 수자원정책은 홍수방어 즉, 치수가 주요 관심의 대상이었으나, 경제성장과 더불어 삶의 질이 향상되고 도시화로 인한 생활용수수요 증가와 아울러 전국적으로 공업단지가 조성되어 공업용수의 수요 역시 급격한 증가추세인 반면, 댐건설 등이 어려운 상황임을 고려하면 장래의 작은 가뭄에도 물부족 현상이 도래할 것으로 예상된다(심재현, 1995).

따라서, 수자원개발에 대한 구조적 대책은 한계에 도달하였기 때문에 이를 극복하기 위해서는 물부족에 대한 비구조적 대책의 일환으로 가뭄을 조기 경보하고, 이를 효율적, 과학적인 방법으로 감시, 관리하여 가뭄피해를 최소화하는 것이 절실한 실정이다. 특히, 댐건설 등 수자원개발이 곤란하고 광역상수도의 혜택을 받지 못하여 상습적으로 물공급의 곤란을 받고 있는 해안 및 도서지역의 가뭄피해를 최소화하기 위해서는 필수적으로 가뭄을 감시하고 관리하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

본 연구에서는 가뭄의 추계학적 거동특성을 살펴보고자 하였으며, 이를 위해 Palmer(1965)의 가뭄심도지수(PDSI, Palmer Drought Severity Index)를 이용하였다. 대상지역으로 결정한 목포지역의 PDSI를 산정한 후, 추계학적 거동특성을 분석하기 위하여 월PDSI를 Karl(1986)에 의하여 제시된 추계학적 등급을 1등급에서 7등급으로 구분하고 각 등급 분류에 대한 적정성을 검증하였다. 검증방법은 대상지역의 과거 큰 가뭄

이었던 1994년부터 1995년까지 전남 지방신문에 기재된 가뭄관련 기사를 근거로 하여 추계학적 등급별 피해 현황을 분석하였다.

또한, 장래의 안정적인 추계학적 등급을 산정하기 위하여 1월에서 12월까지 추계학적 등급이 발생한 경험적인 확률과 확률의 동적(dynamic) 측면을 고려한 마코프연쇄(Markov chain)에 의하여 월 정상상태확률(monthly steady state probability)을 구하여 비교 분석하였다. 월 정상상태확률은 과거자료를 이용하여 임의 월에 임의 등급 발생확률이 무한히 반복하였을 경우, 마코프연쇄의 속성인 안정적인 해에 해당되므로 장래 대상지역의 가뭄의 크기 변화 양상을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 가뭄지수의 산정

2.1 PDSI(Palmer Drought Severity Index)

PDSI(Palmer Drought Severity Index)는 강수량, 기온 및 유효토양수분량에 의한 단순한 개념의 물수지방정식으로 가뭄지수를 구하였기 때문에 물리적 현상을 규명하는 이론적 배경이 미약한 한계(Alley, 1984)에도 불구하고 미국 등 선진국에서 많이 사용될 뿐 아니라 WMO에서도 권장하고 있는 방법이다.

Palmer(1965)는 가뭄(drought)을 “장기간의 이상습윤부족”이라 정의하였으며, 이상습윤부족은 “정상적인 기후에서 현저하게 벗어난 비정상적인 습윤부족기간”이라 정의된다. 이는 일반적으로 사소한 불편이나 고통 등을 발생시키는 수분부족이 아니라, 수분의 부족이 심하여 인명 또는 재산의 손실을 야기하는 현상으로써, 최소한 2-3개월에서 일반적으로 1년 이상 장기간의 수분부족이 지속되는 것을 의미한다.

이러한 가뭄의 정의를 통해 Palmer는 가뭄의 심도를 수분부족량과 수분부족기간의 합수로 나타내었는데, 통계적으로 시간과 공간의 일관된 비교를 통해 얻어지는 가뭄지수의 개발을 위해 기후적으로 상이한 두 지역인 미국의 Kansas와 Iowa 지역을 대상으로 하였다. 강수량이 매우 적고 건조한 기후를 가진 Kansas는 연 강수량의 70%가 여름에 발생하는 지역이며, 습한 기후를 가진 Iowa는 연 강수량의 65% 정도가 여름에 집중되는 지역이다. 이와 같이 서로 상이한 기후 특성을 가진 두 지역에서는 Kansas의 보통 기후가 Iowa에서는 이상건조기후로 받아들여져서 가뭄으로 느껴질 수 있으며, 반면에 Kansas에 내리는 1인치의 비는 Iowa에 내리는 1인치의 비보다 훨씬 중요한 의미를 가지게

된다.

PDSI는 이러한 두 지역 및 그의 미국내의 여러 지역에서의 강수량, 기온 및 일조시간 등의 자료를 사용해서 Thornthwaite와 Mather(1955)의 월열지수법(monthly heat index method)으로 잠재증발산량을 추정한 후, 대상지역의 실제 강수량과 기후학적으로 필요한 강수량의 차에 대한 계산을 통해 얻어지게 된다. 이와 같은 방법을 통해 유도된 대상 지역의 PDSI는 식 (1)과 같다.

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

여기서, X 는 가뭄심도지수, Z 는 수분이상지수, i 는 해당 월을 의미한다.

따라서 식 (1)은 전월의 가뭄심도지수에 그 달의 수분공급량의 크기인 수분이상지수를 더하여 연속적으로 월별 가뭄심도지수가 산정되기 때문에 농업적 가뭄에 속한다.

이러한 PDSI의 적용 예를 살펴보면, Karl과 Koscielny(1982)는 미국 전역을 대상으로 1895년부터 1981년까지 기상자료를 이용, PDSI에 의한 가뭄의 공간적 성향을 분석하여 가뭄지수도를 작성하였다. Hecht(1983)는 PDSI를 이용하여 미국 대평원지역에 대한 역사적 가뭄사상을 평가하였고, Alley(1985)는 뉴저지지역의 하천유량지표, 지하수지표 등 수문학적 가뭄과 PDSI와의 상관성을 규명하였다. Wilhite 등(1986)은 PDSI로서 미 연방정부로부터 가뭄피해지역에 피해보상 대상자의 적정성평가와 재해지정의 중요한 설정기준으로 사용하였다. 최근 Lohani와 Loganathan(1997)은 PDSI를

이용하여 미국 버지니아지역을 대상으로 가뭄관리를 위한 조기경보시스템을 제시하였다.

PDSI의 국내 적용의 경우, 유경희(1985)는 14개 기상관측소의 자료를 이용하여 각 관측지점에 대한 PDSI를 산정하여 각 지점에 대한 시간적, 공간적 분포특성을 분석하였다. 최영진 등(1994)은 25개 기상관측지점에 대하여 PDSI를 산정하여 우리나라 가뭄의 시간적, 공간적 분포특성을 분석하였다. 또한 건설교통부(1995)에서는 전국 기상관측소의 강수량, 기온 등 기상자료를 이용하여 각 관측지점에 대한 PDSI를 산정하여 전국에 대한 Palmer 가뭄지수도를 작성하였고, 1994~1995년 가뭄심도를 상대적으로 평가하였다. 또한, 안재현(1995)과 윤용남 등(1997)은 PDSI로 과거 5개 가뭄사상에 대하여 가뭄기간분석과 가뭄지수도를 작성하였으며 PDSI는 가뭄을 정량적으로 표현되는 유용한 방법임을 보여준 바 있다.

2.2 PDSI의 산정

본 연구의 대상지역은 목포지역을 중심으로 하였으며, 목포지역은 타지역에 비하여 수자원의 부족량이 적고 하천의 유로장이 짧아 단시간에 바다로 유출됨으로서 수자원의 보전이 어려운 실정이며, 유역내 대부분은 농업지역으로 타지역에 비하여 체감가뭄이 더 크다.

과거 기록에 의하면 대부분의 가뭄은 약 7~10년 주기로 전국적으로 발생하여 큰 곤란을 겪어 왔었다. 특히, 목포지역을 중심으로 서남해안지역의 수자원개발은 한강, 낙동강 수계와 비교하여 볼 때, 댐건설 적지부족으로 인하여 다목적댐군이 형성되지 않았으며 유역내

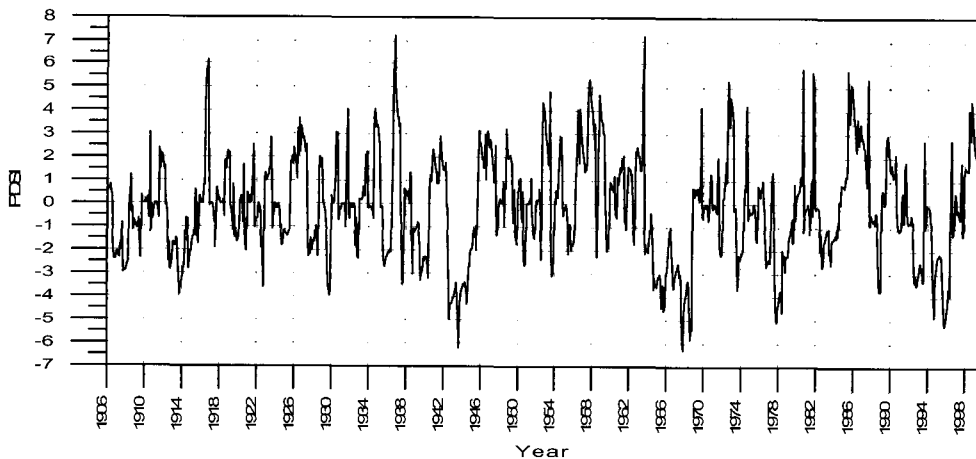


그림 1. 목포지역의 월PDSI

표 1. PDSI의 추계학적 등급 범위

X	Class	Stochastic Class
4.00 or more	Extremely Wet	1
3.00 to 3.99	Severely Wet	2
1.50 to 2.99	Mild to Moderate Wetness	3
-1.49 to 1.49	Near Normal	4
-1.50 to -2.99	Mild to Moderate Drought	5
-3.00 to -3.99	Severe Drought	6
-4.00 or less	Extreme Drought	7

표 2. 월추계학적 등급

연도	월별 추계학적 등급												연도	월별 추계학적 등급											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1906	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	1953	3	3	3	3	3	1	4	5	6	6	5	4
1907	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	1954	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4
1908	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1955	4	4	4	4	4	5	4	4	5	5	5	5
1909	4	4	4	4	4	5	5	4	4	4	4	4	1956	5	5	4	3	3	1	3	3	1	2	3	3
1910	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	1957	3	3	4	3	4	3	1	1	1	1	1	1
1911	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	1958	2	2	3	2	4	4	5	3	2	1	1	2
1912	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	1959	2	2	2	3	4	4	4	5	4	5	4	4
1913	5	5	5	5	4	5	5	6	6	6	6	6	1960	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
1914	6	5	5	5	4	4	4	5	5	5	5	5	1961	3	4	3	3	3	4	4	4	4	4	3	4
1915	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	1962	3	4	4	4	4	4	5	4	3	3	3	3
1916	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	1963	3	3	4	4	3	1	1	4	5	5	5	5
1917	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	1964	5	5	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6
1918	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	1965	6	6	6	6	6	7	7	6	7	6	6	6
1919	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	1966	5	5	5	4	4	4	5	3	2	1	1	1
1920	4	4	4	4	4	4	3	4	4	5	5	4	1967	5	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	7
1921	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	1968	7	6	6	6	6	7	7	7	7	4	4	4
1922	4	4	4	4	4	5	4	5	6	4	4	4	1969	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4
1923	4	4	4	3	4	3	3	4	4	4	4	4	1970	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1924	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	1971	4	4	4	4	4	3	3	4	5	5	5	5
1925	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	1972	4	4	4	4	3	4	2	1	1	2	1	1
1926	3	3	3	4	2	3	2	3	2	3	3	3	1973	1	2	4	4	4	4	5	6	6	5	5	5
1927	3	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	1974	5	5	5	4	4	4	2	1	4	4	4	4
1928	5	5	4	4	4	5	5	4	3	3	3	3	1975	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4
1929	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6	4	1976	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
1930	4	4	4	4	4	2	3	2	4	4	4	4	1977	5	5	4	4	4	4	5	6	7	7	7	7
1931	4	4	4	4	4	4	4	3	1	4	4	4	1978	7	6	6	6	7	5	5	5	5	5	5	5
1932	4	4	4	4	4	4	5	4	5	5	5	4	1979	5	5	4	4	4	4	5	5	4	4	4	4
1933	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	1980	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4
1934	4	4	4	4	4	4	2	1	2	2	2	2	1981	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	4	4
1935	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	1982	4	4	4	4	4	5	4	5	5	5	5	5
1936	5	5	5	5	5	4	3	1	1	1	1	1	1983	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	4
1937	2	2	2	2	4	4	5	6	6	4	4	4	1984	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1938	4	4	4	4	4	4	4	5	6	4	4	4	1985	4	4	4	4	3	1	1	2	1	1	1	1
1939	4	4	4	4	4	5	6	5	5	5	5	5	1986	1	2	2	3	3	2	3	3	2	2	3	3
1940	5	5	5	5	6	4	4	4	4	3	3	3	1987	3	3	3	3	3	4	2	1	4	4	4	4
1941	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	1988	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6
1942	3	4	3	4	4	4	6	7	7	7	7	7	1989	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3
1943	7	7	6	6	6	7	7	7	7	7	6	6	1990	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4
1944	6	6	6	6	6	6	7	6	5	5	5	5	1991	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4
1945	5	5	4	4	4	4	5	4	3	2	3	3	1992	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6
1946	3	3	3	3	3	3	4	3	2	3	3	3	1993	5	5	5	5	5	6	6	3	4	4	4	4
1947	3	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	1994	4	4	4	4	4	5	6	6	7	6	5	5
1948	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	3	3	1995	5	5	5	5	5	5	6	6	7	7	7	7
1949	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	4	1996	7	7	6	6	6	4	3	4	4	4	4	4
1950	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	1997	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3
1951	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1998	3	3	3	4	4	1	2	3	1	2	3	1
1952	4	4	4	4	4	4	5	3	1	1	2	2	1999	3	3	3	3	3	4	3	2	1	1	1	1

표 3. 1994~1995년 4개 담의 저수율 현황

연도	담 명	월별 저수율(%)												평균
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
평년	장성호	73.3	76.0	79.0	82.7	83.3	65.0	68.7	69.3	68.3	69.0	70.7	72.7	73.0
	나주호	64.3	65.3	68.0	71.7	72.0	57.0	60.3	62.3	63.7	63.3	64.0	64.3	65.0
	담양호	71.7	72.7	75.0	78.7	79.0	64.0	69.0	70.0	69.7	70.0	70.0	71.3	72.0
	광주호	81.7	83.3	86.0	89.3	86.7	64.0	74.0	78.0	78.3	79.0	79.7	81.0	80.0
1994	장성호	71.7	74.0	75.3	78.0	80.7	58.7	36.3	33.7	27.7	22.7	25.3	26.3	51.0
	나주호	67.3	68.0	69.3	70.0	69.7	50.0	30.3	27.7	22.0	17.3	18.0	19.0	44.0
	담양호	59.7	60.7	61.7	64.7	68.3	50.0	34.3	29.0	22.0	17.7	18.0	18.0	42.0
	광주호	93.0	97.6	99.7	100.0	98.0	64.7	38.3	46.0	42.0	37.0	40.0	43.7	67.0
	추계학적 등급	4	4	4	4	4	5	6	6	7	6	5	5	
1995	장성호	27.7	30.0	32.3	38.0	48.0	36.0	23.3	24.3	45.0	43.0	43.0	43.0	36.0
	나주호	19.3	20.7	21.0	24.3	29.0	28.0	24.0	26.0	26.7	27.0	27.0	27.0	25.0
	담양호	18.3	20.0	22.0	25.3	32.3	23.7	14.0	13.7	27.3	26.0	26.0	26.0	23.0
	광주호	45.7	47.7	53.0	55.7	72.7	61.0	46.7	44.3	53.7	52.7	54.0	55.0	54.0
	추계학적 등급	5	5	5	5	5	5	6	6	7	7	7	7	

영산강수계는 유로연장이 짧아 단시간에 바다로 유출되기 때문에 지리적으로 매우 불리한 실정이다. 따라서 대상지역의 체감가뭄은 타지역에 비하여 상대적으로 클 뿐 아니라 60년대 이후 주요 가뭄기간인 '67~'68년, '77~'78년, '81~'82년, '87~'88년 및 '94~'95년의 5개 가뭄기간 동안 빠짐 없이 가뭄의 피해를 입어 왔었다(최영박, 1987; 건설교통부, 1995).

이러한 목포지역의 월PDSI를 산정하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 2년 연속가뭄이 발생하였을 경우, 2년차 PDSI는 대부분 1년차에 비하여 극심한 값으로 나타났다. 그 원인은 Palmer지수의 중요한 인자인 강수량이 무강수일수 지속으로 인하여

강우부족량이 누적됨에 따라 상부 및 하부의 토양수분이 고갈되었기 때문이다.

3. PDSI의 추계학적 등급 결정

3.1 PDSI의 추계학적 등급 산정

Karl(1986)은 PDSI를 표 1에서 보는 바와 같이 추계학적 등급(이하 등급)의 범위를 1등급에서 7등급으로 분류하였다. 그림 1의 목포지역 월PDSI를 표 1에 의하여 분류된 목포지역의 등급은 표 2와 같다. 표 2에서 보는 바와 같이 n 월의 가뭄 혹은 습윤등급을 나타내는 무작위변수 X_n 은 1906년 1월의 경우, $X_1=4$ 이므로

표 4. 추계학적 등급별 피해현황

추계학적 등급	현황	추계학적 등급	현황
4	<ul style="list-style-type: none"> ·완도읍, 흑산도 등 3개 도서지역 3일제 급수 ·밭작물 제대로 못 자람 	6	<ul style="list-style-type: none"> ·저수지 62%고갈 ·논, 밭 34%(9만여ha) 피해 ·콩 수확 포기, 고추 60% 고사 ·직조 현상 ·농작물 반 이상 고사 ·전남도내 벼 90ha 고사 ·광주시 고지대 소방차 급수
5	<ul style="list-style-type: none"> ·9.7ha 논바닥 갈라짐 ·고추, 참깨 등 생육 부진으로 열매를 맺지 못함 ·천수담 모내기 불가 ·간이 상수원 고갈(관정 이용) ·일부지역 제한급수 ·가뭄 극복 민, 관, 군 총력전 ·절수 캠페인 전개 	7	<ul style="list-style-type: none"> ·간척지 염해 피해 2,216ha, 304ha 고사 ·담양호 바닥 드러냄 ·일부 제한 급수 ·6,000여 ha 농경지 가뭄 피해

1906년 1월에 4등급이 발생하였음을 의미한다.

3.2 PDSI의 추계학적 등급 검증

표 2에 나타난 PDSI의 등급에 대한 적정성을 검증하기 위하여 가뭄의 피해가 2년 연속 심각하였던 1994년 1월 1일부터 1995년 10월 31일까지 영산강 유역내 4개 댐의 저수율 및 전남지역 신문인 전남일보에 게재된 가뭄관련기사를 근거로 하여 등급별 피해현황을 분석하였다.

표 3은 1994년과 1995년에 대한 영산강 유역내 4개 댐의 월저수율 현황을 보여 주고 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 등급이 커질수록 영산강 유역내 농업용 4개 댐은 상대적으로 저수율이 작아지며 1995년의 경우, 우기의 강수량이 절대적으로 부족하여 겨울가뭄이 지속되어 4개 댐 저수율은 점차 떨어지는 양상을 보여 주고 있다.

1994~1995년 가뭄기간동안 신문기사 내용을 기초로 하여 정상상태인 4등급 이상에 대한 피해현황을 정리하면 표 4와 같고, 가뭄진행 현 상황에 따라 전개된 등급은 신문기사내용과 비교적 일치하였으며, PDSI를 이용한 가뭄의 추계학적 등급이 가뭄의 현황을 잘 표현하고 있음을 알 수 있었다.

4. PDSI의 추계학적 거동 분석

4.1 추계학적 등급의 전이확률

월PDSI에 대한 등급의 전이확률(transition probability)은 n 월의 i 등급에서 다음 월인 $(n+1)$ 월의 j 등급으로 전이될 확률을 의미한다. 여기서 전이확률은 확률이 정적(static)인 것이 아니라 동적(dynamic)인 것을 의미하며, 이것을 확률과정(stochastic process)이라 하고 특수한 형태의 일종의 마코프과정(markov process)이다(Isaacson과 Madsen, 1976; Norris, 1998). 특히, 확률과정 중에서 상태공간(state space)이 이산형인 확률과정을 주 대상으로 하는 성질을 마코프성질(markov property)이라 한다.

마코프성질은 $\{X_t : t \in T\}$ 를 이산형 공간상태의 확률과정이라 하고 여기서 T 는 실수집합이고 모든 t 에 대하여 X_t 가 확률변수임을 나타내고 있으며, 첨자 t 는 시간을 나타내므로 시점 t 에서의 상태를 표현한 것이다. 다음 식 (2)를 만족하면 $\{X_t : t \in T\}$ 를 마코프과정이라 한다.

상태공간내의 모든 $k_1, k_2, \dots, k_n, k_{n+1}$ 에 대하여 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \leq t_{n+1}$ 이 T 의 요소이고 $n=0, 1, 2, \dots$

일 때, 마코프과정은 다음과 같이 표현된다.

$$P[X_{t_{n+1}}=k_{n+1} | X_{t_n}=k_n, \dots, X_{t_1}=k_1] \\ = P[X_{t_{n+1}}=k_{n+1} | X_{t_n}=k_n] \quad (2)$$

식 (2)의 좌변에서 시점 t_2, \dots, t_n 의 상태를 알면 시점 t_{n+1} 의 상태가 k_{n+1} 일 확률을 나타낸다. 여기서 t_n 을 현재라고 보면 t_1, \dots, t_{n-1} 은 미래가 된다.

마코프성질에 의하면 미래는 현재가 주어진 조건하에서 과거와는 독립적이다. 따라서 마코프과정은 현재상태를 알고 있으면 과거와는 상관없이 장래의 확률분포를 알 수 있음을 의미하며 식 (2)와 같이 이산상태의 마코프과정을 특히 마코프연쇄(markov chain)라 하며 마코프연쇄는 $\{X_1, X_2, \dots\}$ 와 같은 형태를 가진다.

예를 들어 n 일의 날씨가 맑으면 $X_n=1$, 흐리면 $X_n=2$, 비가 오면 $X_n=3$, 눈이 오면 $X_n=4$ 라고 하였을 때, 상태공간은 $\{1, 2, 3, 4\}$ 이다. 주어진 시점에서 정의된 상태공간에서 단 하나의 상태를 취하고 그 상태에서 다른 상태로 이동하는 확률을 계산하게 되며 이것을 전이확률(transition probability)이라 한다.

전이확률은 $P[X_{n+1}=j | X_n=i]$ 을 의미하며, n 에 상관없이 i 이다. 따라서 $X_n=i$ 인 조건에서 X_{n+1} 은 반드시 어떤 값을 가져야 하며 시점 n 에서 i 라는 조건에서 시점 $n+1$ 에서 j 로 되는 조건부확률은 시점 n 에 무관하며 정상상태(stationary)의 전이확률 또는 동질성(homogeneity property)을 가진다

$$P_{i,j} = P[X_{n+1}=j | X_n=i] \quad (3)$$

각 이동을 단계(step)라 하고 특히, 식 (3)을 1단계 전이확률(one-step transition probability)이라고 한다. 모든 i 에 대하여 $P_{i,j} \geq 0$ 이고 식 (4)를 만족하여야 한다.

$$\sum_j P_{i,j} = 1 \quad (4)$$

전이확률을 가장 편리하게 표현하는 방법은 행렬(matrix)이다. 본 연구에 적용되는 1단계 전이확률 형태는 식 (5)와 같이 표현되며 이것을 전이행렬이라 한다(허선, 1997).

$$P = P_{ij} = \begin{matrix} & \text{상태} & 1 & 2 & \dots & \dots & \dots & M \end{matrix} \quad (5)$$

	상태	1	2	...	...	...	M
1		P_{11}	P_{12}	...	...	...	P_{1M}
2		P_{21}	P_{22}	...	...	...	P_{2M}
.	
.	
.	
M		P_{M1}	P_{M2}	...	...	...	P_{MM}

본 연구에서는 월PDSI자료를 기초로 하여 자료의 시작년, 시작월인 1906년 1월에서 2월, 2월에서 3월, ..., 12월에서 1월 등 1999년까지 등급에 의한 전이행렬을 구하였다. 시간인자는 임의 월을 의미하며 이때의 상태공간은 $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 을 의미한다. 따라서 상태공간이 이산형 마코프연쇄가 된다.

n 월의 i 등급에서 $(n+1)$ 월의 j 등급으로 전이될 때 $P_{i,j}^{(n,n+1)}$ 로 표시되는 전이확률은 시작월의 상태공간 7개 등급 확률을 나타내는 초기 등급벡터 $f^{(0)}$ 가 규정되면 마코프연쇄로 표현할 수 있으며 이 행렬은 연편차가 없는 주기성을 갖는 것으로 가정할 수 있다. 왜냐하면 전이확률은 연이 아닌 월에 종속되기 때문이다 (Issacson과 Madsen, 1976; Norris, 1998).

전이확률의 조건부확률은 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.

$$P_{i,j}^{(n,n+1)} = P[X_{n+1}=j | X_n=i], \quad i, j=1,2,\dots, 7, n=1,2,\dots,12 \quad (6)$$

여기서, i, j : 표 7.1에서 제시된 등급(1, 2, ..., 6, 7)
 n : 시간인자(월 : 1, 2, ..., 11, 12)

따라서, 전이확률은 식 (7)로 표현된다.

$$P_{i,j}^{(n,n+1)} = N_{i,j}^{(n,n+1)} / N_i^{(n)} \quad (7)$$

여기서, $N_{i,j}^{(n,n+1)}$: n 월 i 등급에서 $(n+1)$ 월 j 등급으로 전이횟수

$N_i^{(n)}$: n 월 i 등급 발생횟수

만약 $N_i^{(n)}$ 가 임의의 i 등급발생횟수가 0이면 $j = 1, 2, \dots, 7$ 의 모든 등급에 $P_{i,j}^{(n,n+1)} = 1/7$ 로 정의된다.

본 연구에서 분석한 목포지역 PDSI의 추계학적 등급의 발생횟수는 표 5와 같다. 표 5에서 보는 바와 같이 4등급이 발생한 횟수는 1,128회 중 559회가 발생하여 전체 발생 횟수의 49.6%가 여기에 해당된다. 이것은 정상상태 즉, 평균에 가까운 등급이 4등급임을 의미하며, 1월에서 5월까지의 전체백분율 중에서 4등급이 넓게 분포하고 있는 양상을 보여 주고 있다. 또한, 표 6에 나타난 7월부터 2월까지의 5등급 발생횟수는 17회 이상으로 건조기에서는 다른 월에 비하여 발생횟수가 많았다.

표 6에서 보는 바와 같이 1월부터 12월까지 전체 월에 대한 발생횟수 1,128회 중 314회가 가뭄상태인 5등급 이상이었으며 27.8%에 해당된다. 또한, 7월부터 12월까지의 평균을 상회하는 횟수가 발생하였으며 이와 같은 현상은 우기인 7월에 가뭄이 시작되면 지표면의 증발로 인하여 수분의 공급원 부족으로 겨울 가뭄으로 지속될 가능성이 큼을 의미한다. 6등급 이상의 경우와 7등급 역시 5등급 이상의 경우와 비슷한 양상을 보여

표 5. 추계학적 등급 발생횟수

월 \ 등급	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
1	2	0	0	0	0	6	4	8	12	8	6	5	51
2	3	5	3	2	1	2	7	3	6	7	3	3	45
3	18	14	12	12	10	6	17	18	10	11	15	16	159
4	47	52	62	66	71	60	34	30	27	32	36	42	559
5	17	17	11	8	4	14	22	20	20	22	22	17	194
6	3	4	6	6	7	3	6	10	11	8	8	7	79
7	4	2	0	0	1	3	4	5	8	6	4	4	41
계	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	1128

표 6. 추계학적 5등급 이상 발생횟수

등급	구분	월												계
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5등급 이상	횟수	24	23	17	14	12	20	32	35	39	36	34	28	314
	%	25.5	24.5	18.1	14.9	12.8	21.3	34.0	37.2	41.5	38.3	36.2	29.8	27.8
6등급 이상	횟수	7	6	6	6	8	6	10	15	19	14	12	11	120
	%	7.4	6.4	6.4	6.4	8.5	6.4	10.6	16.0	20.2	14.9	12.8	11.7	10.6
7등급	횟수	4	2	0	0	1	3	4	5	8	6	4	4	41
	%	4.3	2.1	0.0	0.0	1.1	3.2	4.3	5.3	8.5	6.4	4.3	4.3	3.6

표 7. 목포 월 PDSI의 n 월 i 등급에서 $(n+1)$ 월 j 등급으로의 전이확률

1월 $i \rightarrow 2$ 월 j 전이확률								2월 $i \rightarrow 3$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
2	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.0000	0.6000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.7222	0.2778	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.0000	0.0000	0.6429	0.3571	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0213	0.9787	0.0000	0.0000	0.0000	4	0.0000	0.0000	0.0385	0.9615	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0588	0.9412	0.0000	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.3529	0.6471	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
3월 $i \rightarrow 4$ 월 j 전이확률								4월 $i \rightarrow 5$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	1	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
2	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0833	0.5833	0.3333	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.0000	0.0000	0.5833	0.4167	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0484	0.9516	0.0000	0.0000	0.0000	4	0.0000	0.0152	0.0455	0.9394	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2727	0.7273	0.0000	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.5000	0.2500	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8333	0.1667
7	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	7	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
5월 $i \rightarrow 6$ 월 j 전이확률								6월 $i \rightarrow 7$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	1	0.5000	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.4000	0.1000	0.1000	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.1667	0.1667	0.5000	0.1667	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0282	0.0141	0.0563	0.7465	0.1549	0.0000	0.0000	4	0.0000	0.0833	0.1833	0.4667	0.2500	0.0167	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.5000	0.2500	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2857	0.5000	0.2143	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2857	0.0000	0.2857	0.4286	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6667	0.3333
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
7월 $i \rightarrow 8$ 월 j 전이확률								8월 $i \rightarrow 9$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.5000	0.2500	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.5000	0.1250	0.0000	0.3750	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.5714	0.0000	0.2857	0.1429	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.6667	0.0000	0.0000	0.3333	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0588	0.1176	0.4118	0.4118	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.2222	0.2222	0.3333	0.2222	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0294	0.0000	0.1765	0.4412	0.3529	0.0000	0.0000	4	0.0667	0.0333	0.1333	0.5667	0.2000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0909	0.2727	0.3182	0.2727	0.0455	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.6500	0.2500	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.1667	0.0000	0.1667	0.3333	0.3333	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.6000	0.3000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
9월 $i \rightarrow 10$ 월 j 전이확률								10월 $i \rightarrow 11$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.5833	0.2500	0.0000	0.1667	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.6250	0.1250	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.1667	0.5000	0.3333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.1429	0.2857	0.5714	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.1000	0.8000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.0000	0.0000	0.9091	0.0909	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0370	0.8519	0.1111	0.0000	0.0000	4	0.0000	0.0000	0.0313	0.9375	0.0313	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.9000	0.0000	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.1364	0.8636	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2727	0.0909	0.6364	0.0000	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2500	0.7500	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	0.0000	0.1250	0.7500	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667
11월 $i \rightarrow 12$ 월 j 전이확률								12월 $i \rightarrow 1$ 월 j 전이확률							
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7
1	0.8333	0.1667	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.8667	0.1333	0.0000	0.0000	0.0000	3	0.0000	0.0000	0.8750	0.1250	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0556	0.9444	0.0000	0.0000	0.0000	4	0.0000	0.0000	0.0476	0.9524	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2273	0.7727	0.0000	0.0000	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.1765	0.8235	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250	0.0000	0.8750	0.0000	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.1429	0.4286	0.4286	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

주고 있다. 표 7은 목포지역 n 월의 i 등급에서 $(n+1)$ 월의 j 등급으로의 전이확률을 보여주고 있다.

4.2 월 정상상태확률

월 정상상태확률(monthly steady state probabilities)은 전이확률이 여러 횟수 변환을 거친 다음 어느 특정한 상태 j 에 있을 확률은 각 상태에 대하여 결정된 초기 확률분포와는 상관없이 일정한 안정적인 해에 접근하는 경향이 있음을 의미한다. 즉, 과정이 어느 하나의 상태에 머무는 것이 아니라 과정은 상태에서 상태로 변환을 계속하여 어떤 단계인 n 에서도 상태 i 로부터 상태 j 로 전이되는 변환확률은 변함 없이 P_{ij} 로 되는 것을 의미한다(허선, 1997; Isaacson과 Madsen, 1976; Norris, 1998).

본 연구에서는 표 7의 전이확률을 이용하여 목포지역의 월 정상상태확률을 산정하였다. $f^{(k)}$ 는 k 회 전이 이후의 표 2의 7개 등급 $i = 1, 2, \dots, 7$ 에 대한 $P(X_k = i)$ 의 등급확률 열벡터(class probability row vector)이며, 식(8)과 같이 표현된다.

$$f^{(k)} = [f_1^{(0)}][P_1][P_2] \dots [P_k] \quad (8)$$

여기서, $f_1^{(0)}$: 초기 상태확률 열벡터, 즉 시작월의 i 등급 초기 확률($i=1,2,\dots,7$)

P_1 : 1월에서 2월의 전이확률행렬(7×7),
즉 $P_1 = P^{(1,2)} = P^{(Jan, Feb)}$

P_2 : 2월에서 3월의 전이확률행렬(7×7),
즉 $P_2 = P^{(2,3)} = P^{(Feb, Mar)}$

P_k : k 월에서 $(k+1)$ 월의 전이확률행렬(7×7), 즉 $P_k = P^{(k, k+1)}$

식 (8)에서 계산 시작월은 12개월 중 어떤 월이 되어도 상관없으며 행렬의 주기성에 의하여 $P^{(14,15)}$ 로 표기되는 14, 15월의 전이행렬은 2월에서 3월의 전이행렬인 $P^{(2,3)} = P^{(Feb, Mar)}$ 과 같고 표 7에서 산정된 결과에 의한다. 장기간 변환으로 $k \rightarrow \infty$ 이면 $f^{(\infty)}$ 가 $f^{(0)}$ 에 독립적인 정상상태확률을 갖게 된다. $f_m^{(k)}$ 에서 $k \rightarrow \infty$ 이면 1월의 추계학적행렬은 시작 행렬을 1월로 하여 연속되는 12개월의 행렬들의 곱으로 정의된다.

$$\phi^{(1, \infty)} = [Jan] = \{[P_1][P_2] \dots [P_{11}][P_{12}]\} \{[P_1][P_2] \dots [P_{11}][P_{12}]\} \dots \quad (9)$$

따라서, 정상상태확률 $[Jan]$ 은 추계학적 행렬상수이므로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$row[Jan] = f_1^{(\infty)} \quad (10)$$

여기서, $f_1^{(\infty)}$ 는 1월을 초기벡터로 하여 계산된 정상상태확률행렬 $\phi^{(1, \infty)}$ 의 행(row)벡터이다. 식 (9)와 같은 방법으로 2월의 추계학적 행렬을 표시하면 식 (11)과 같다.

$$\phi^{(2, \infty)} = [Feb] = \{[P_2][P_3] \dots [P_{11}][P_{12}][P_1]\} \{[P_2][P_3] \dots [P_{11}][P_{12}][P_1]\} \dots \quad (11)$$

그러므로 식 (11)은 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$[Feb] = [P_2][P_3] \dots [P_{11}][P_{12}][Jan][P_1] \quad (12)$$

식 (12)를 다시 표현하면,

$$[Feb] = [Jan][P_1] \quad (13)$$

그러므로

$$row[Feb] = f_2^{(\infty)} = row[Jan][P_1]$$

같은방법으로,

$$\begin{aligned} row[Mar] &= f_3^{(\infty)} = row[Feb][P_2] \\ row[Apr] &= f_4^{(\infty)} = row[Mar][P_3] \\ row[May] &= f_5^{(\infty)} = row[Apr][P_4] \\ &\vdots \\ row[Dec] &= f_{12}^{(\infty)} = row[Nov][P_{11}] \\ row[Jan] &= f_1^{(\infty)} = row[Dec][P_{12}] \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 일반적인 식으로 표현하면 식 (15)가 된다.

$$row[Month_{n+1}] = row[Month_n][P_n] \quad (15)$$

식 (15)는 가뭄 혹은 습윤의 월 정상상태확률을 구하는 식이며 이 식은 월 정상상태확률의 항인 선형방정식이다.

표 7의 전이확률을 식 (15)에 적용하여 월 정상상태확률을 구할 때, 식 (15) 우변항의 행(row)은 시작월의 어떤 등급을 초기 벡터로 주어져도 월 정상상태확률의 값은 변함이 없다. 왜냐하면 식 (2)의 Markov성질의 특성에 의하여 미래($i+step$)는 과거($i-step$)과는 독립적이기 때문에 과거 자료로부터 현재(i)의 상태를 알면 다음 단계를 알 수 있기 때문이다. 예를 들어 표 7에서 5월 i 등급에서 6월 j 전이확률에서 5월의 월 정상상태확률을 구할 경우, 초기확률벡터인 1등급에서 7등급까지 어떤 행(row)을 이용하여도 동일한 월 정상상태확률이 산정된다. 즉, [0.0000, 0.0152, 0.4555,

표 8. 경험적 확률과 월 정상상태확률

월	구분	등급						
		1	2	3	4	5	6	7
1	경험적 확률	0.0213	0.0319	0.1915	0.5000	0.1809	0.0319	0.0426
	정상상태확률	0.0269	0.0376	0.1934	0.4939	0.1824	0.0322	0.0429
2	경험적 확률	0.0000	0.0532	0.1489	0.5532	0.1809	0.0426	0.0213
	정상상태확률	0.0000	0.0645	0.1502	0.5478	0.1823	0.0429	0.0214
3	경험적 확률	0.0000	0.0319	0.1277	0.6596	0.1170	0.0638	0.0000
	정상상태확률	0.0000	0.0387	0.1306	0.6579	0.1180	0.0644	0.0000
4	경험적 확률	0.0000	0.0213	0.1277	0.7021	0.0851	0.0638	0.0000
	정상상태확률	0.0000	0.0238	0.1338	0.7017	0.0858	0.0643	0.0000
5	경험적 확률	0.0000	0.0106	0.1064	0.7553	0.0426	0.0745	0.0106
	정상상태확률	0.0000	0.0107	0.1099	0.7599	0.0429	0.0751	0.0107
6	경험적 확률	0.0638	0.0213	0.0638	0.6383	0.1489	0.0319	0.0319
	정상상태확률	0.0654	0.0217	0.0644	0.6434	0.1499	0.0322	0.0322
7	경험적 확률	0.0426	0.0745	0.1809	0.3617	0.2340	0.0638	0.0426
	정상상태확률	0.0434	0.0752	0.1828	0.3648	0.2358	0.0643	0.0429
8	경험적 확률	0.0851	0.0319	0.1915	0.3191	0.2128	0.1064	0.0532
	정상상태확률	0.0862	0.0324	0.1933	0.3221	0.2145	0.1072	0.0536
9	경험적 확률	0.1277	0.0638	0.1064	0.2872	0.2128	0.1170	0.0851
	정상상태확률	0.1291	0.0644	0.1074	0.2900	0.2145	0.1179	0.0858
10	경험적 확률	0.0851	0.0745	0.1170	0.3404	0.2340	0.0851	0.0638
	정상상태확률	0.0860	0.0752	0.1181	0.3437	0.2360	0.0858	0.0643
11	경험적 확률	0.0638	0.0319	0.1596	0.3830	0.2340	0.0851	0.0426
	정상상태확률	0.0645	0.0322	0.1611	0.3866	0.2360	0.0858	0.0429
12	경험적 확률	0.0532	0.0319	0.1702	0.4468	0.1809	0.0745	0.0426
	정상상태확률	0.0538	0.0323	0.1719	0.4510	0.1824	0.0750	0.0429
평균	경험적 확률	0.0452	0.0399	0.1410	0.4956	0.1720	0.0700	0.0363
	정상상태확률	0.0463	0.0424	0.1431	0.4969	0.1734	0.0706	0.0366

0.9394, 0.0000, 0.0000, 0.0000]의 4등급행렬, 혹은 5등급(행)인 [0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.2500, 0.5000, 0.2500, 0.0000]을 초기확률벡터로 하여 {[P5][P6]...[P3][P4]}...{[P5][P6]...[P3][P4]}...를 여러 횟수 변환시키면 표 8의 5월의 정상상태확률 [0.0000, 0.0107, 0.1099, 0.7599, 0.0429, 0.0751, 0.0107]값이 산정된다. 즉, 초기벡터와 상관없이 5월에서 6월로의 전이확률은 여러 횟수 변환에 의하여 안정적인 해인 정상상태의 확률이 계산됨을 알 수 있다.

표 8에서는 목포지역의 94개년에 대하여 표 5의 월등급 발생횟수에 대한 경험적 확률과 월 정상상태확률을 보여주고 있다. 표 8에서 보는 바와 같이 경험적 확률은 월등급의 발생횟수를 94개년으로 나눈 평균발생확률이며 월 정상상태확률은 식 (15)에 의해 구한 안정적

인 확률이다. 월 정상상태확률을 경험적 확률과 비교하여 볼 때, 그 값의 차이는 미소하게 변화함을 알 수 있다. 가뭄상태 등급인 5등급 이상의 월 정상상태확률의 변화는 경험적 확률에 비하여 전반적으로 미소하게 커지는 것으로 나타났다.

그림 2와 그림 3은 목포지역의 가뭄상태인 5등급, 6등급 및 7등급의 월 정상상태확률과 농번기인 5월, 6월, 7월, 8월 및 9월의 월 정상상태확률을 보여주고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 농업용수수요가 커지는 6월, 7월, 8월 및 9월의 월 정상상태확률은 5등급이 가장 크고 6등급, 7등급의 순이다.

그림 3에서는 용수수요가 커짐으로서 가뭄관리기간인 5월, 6월, 7월, 8월 및 9월의 월 정상상태확률을 보여주고 있다. 정상상태 확률은 정상상태에 가까운 4등

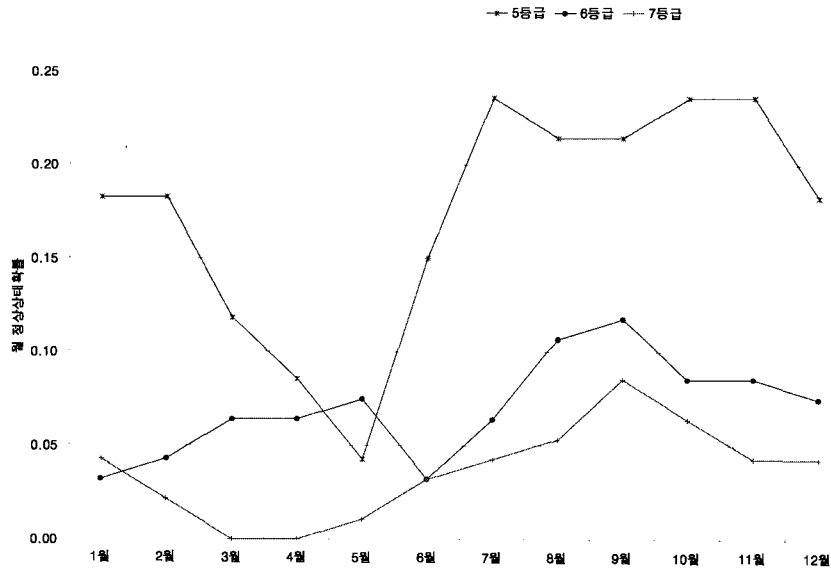


그림 2. 5-7등급 월 정상상태 확률

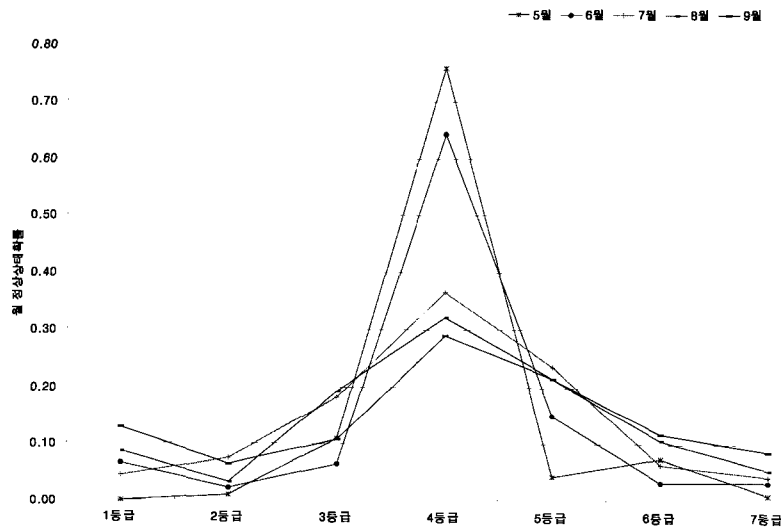


그림 3. 5-9월의 월 정상상태 확률

급이 가장 크게 나타났고, 4등급을 중심으로 습윤상태인 3등급이하 보다는 가뭄상태인 5등급 이상이 다소 크게 나타났다. 이는 미소하게나마 정상상태에서 가뭄상태로 변환될 가능성이 크을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 목표지역을 중심으로 가뭄관리기간동안 가뭄을 감시하고 관리를 하기 위하여 목표기상대 1906년부터 1999년까지 94개년의 월 PDSI를 산정하였으며, 이를 7개의 추계학적 등급으로 분류하여 확률의 동적(dynamic) 측면을 고려한 마코프연쇄(markov

chain)에 의하여 월전이확률을 산정하였다. 또한, 안정적 해인 가뭄의 정상상태확률을 산정하였다. 이와 같은 연구과정을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 월 PDSI를 7개의 추계학적 등급으로 분류한 후, 분류된 등급을 목포지역의 1994~1995년 가뭄에 대하여 등급에 대한 검정 결과, 7개 등급은 적절하게 분류되었음을 알 수 있었다.

둘째, 추계학적 등급의 발생횟수는 대상지역의 기록년에 대한 발생횟수 1,128회 중 정상상태인 4등급은 559회 발생하여 총 발생횟수의 49.6%에 해당되어 7등급 중 4등급이 평균에 가까운 정상상태임을 알 수 있었다.

셋째, 7등급으로 구분한 추계학적 등급을 마코프연쇄를 이용, 안정적 해인 월 정상상태확률을 구하고 기록년에 대한 경험적 확률과 비교하여 분석을 수행하였다. 그 결과, 값의 차이는 크지 않았으나 하절기 극심한 가뭄상태인 7등급에서는 경험적 확률보다 월 정상상태확률이 커지는 성향을 보여 주었다.

넷째, 이와 같이 산정된 월 정상상태확률은 과거자료를 이용하여 임의 월에 임의 등급 발생확률이 무한히 반복하였을 경우, 마코프연쇄의 속성인 안정적인 해에 해당되므로 장래 대상지역의 가뭄의 크기 변화 양상을 예측하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 강인주(2000). **가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구**, 박사학위논문, 고려대학교.
- 건설교통부(1995). **가뭄기록조사 보고서**.
- 김중호, 유동선(1998). **초급확률론**, 자유아카데미.
- 농림부(1995). **'94, '95 가뭄극복**.
- 심재현(1995). "가뭄재해의 극복방안." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제2호, pp. 31-35.
- 안재현(1995). **Palmer 방법을 이용한 가뭄의 분석**, 석사학위논문, 고려대학교.
- 유경희(1985). **남한의 물수지와 한발의 특성**, 석사학위논문, 이화여자대학교.
- 윤용남, 안재현, 이동률(1997). "Palmer의 방법을 이용한 가뭄의 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 317-326.
- 최영박(1987). "갈수(한발)." **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제35권, 제5호, pp. 16-24.
- 최영진(1995). "가뭄의 원인과 예측." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제1호, pp. 16-20.
- 최영진, 김현미, 조하만(1994). "Palmer 방법에 따른 가뭄지수의 산출과 한국의 가뭄의 시·공간적 특성 분석." **기상연구소논문집**, 기상연구소, 제11권, 1호, pp. 67-76.
- 행정자치부(1998). **가뭄피해원인의 조사분석**, 국립방재연구소.
- 허선(1997). **확률과정론**, 청문각.
- Alley, W.M.(1984). "The Palmer Drought Severity Index : Limitations and Assumptions." *J. of Climate and Applied Meteorology*, Vol.23, No.7, pp. 1100-1109.
- Alley, W.M.(1985). "The Palmer Drought Severity index as A Measure of Hydrologic Drought." *Water Resources Bulletin*, Vol.21, No.1, pp. 105-114.
- Hecht, A.D.(1983). "Drought in the Great Plains : History of Societal Response." *J. of Climate and Applied Meteorology*. Vol.22, pp.51-56.
- Isaacson, D.L. and Madsen, R.(1976). *Markov Chains : Theory and Applications*. John Willey and Sons, New York.
- Karl, T.R. and Koscielny, A.J.(1982). "Drought in the United States : 1985~1981." *J. of Climatology*, Vol.2, pp. 313-329.
- Karl, T.R.(1986). "The Sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z Index to Their Calibration Coefficients Including potential Evapotranspiration." *J. of Climate and Applied Meteorology*. 25, pp. 77-86.
- Lohani, V.K., Loganathan, G.V.(1997). "An Early Warning System for Drought Management Using the Palmer Drought Index." *J. of the American Water Resources Association*, Vol.33, No.6, pp. 1375-1386.
- Norris, J.R.(1998). *Markov Chains*, Cambridge University Press, New York.
- Palmer, W.C.(1965). *Meteorological Drought*. Research Paper No.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R.(1955).

"The Water Balance." *Publications in Climatology*, Vol.8, No.1, Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, N.J.

Wilhite, D.A., Rosenberg, N.J. and Glantz,

M.H.(1986). "Improving Federal Response to Drought." *J. of Climate and Applied Meteorology*, Vol.25, pp. 332-342.

(논문번호:02-57;접수:2002.8.20/심사완료:2002.09.23)