

가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구

○ 강인주*, 윤용남**

1. 서 론

본 연구에서는 목포지역을 중심으로 가뭄관리기간 동안 가뭄의 감시, 관리를 위해 목포기상대 기상자료를 이용하여 1906년부터 1999년까지 94개년의 월Palmer 가뭄심도지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 산정, 이를 7개의 추계학적 등급으로 분류하고 확률의 동적(dynamic) 측면을 고려한 Markov chain에 의하여 월 전이확률을 산정하였으며, 전이확률이 여러 횟수 변환을 거친 다음 초기확률분포와 상관없이 일정한 안정적인 해인 월 정상상태확률(monthly steady state probabilities)를 구하여 자료년에 대한 경험적 확률과 비교 분석하였다. 또한 전이확률과 Sharma(1997)가 제시한 가뭄빈도공식에 의하여 5년 빈도 가뭄에 해당되는 18개년을 가뭄년으로 채택하고 가뭄년을 제외한 76개년을 비가뭄년으로 정의하여 의사결정분기도 분석(decision tree analysis)을 실시하였으며 가뭄의 심화정도 분석을 통해 월강수부족량과 전이확률을 동시에 고려하는 잠재강수심도(potential precipitation severity)를 계산하고, 이를 통해 임의 월에서 다음 월로 가뭄의 진행 상황에 따라 가뭄대책의 의사결정을 위한 단계별 방안을 제시하였다. 또한 의사결정분기도에 의하여 가뭄의 심화단계별 조치기준을 3단계로 구분하여 제시하였으며 여기에는 가뭄진행상황에 따라 가뭄의 주의보, 가뭄의 경보, 가뭄의 비상대책 등 각 단계에 대한 조치 기준을 설정하였다.

2. PDSI의 추계학적 거동 분석

Karl(1986)은 표 1에서 보는 바와 같이 PDSI의 추계학적 등급(이하 등급) 범위를 1등급에서 7등급으로 분류하였으며, 여기서 5등급 이상은 가뭄상태를 의미한다. 또한, 월PDSI에 대한 등급의 전이확률(transition probability)은 n 월의 i 등급에서 다음 월인 ($n+1$)월의 j 등급으로 전이될 확률을 의미한다. 전이확률은 확률이 정적(static)인 것이 아니라 동적(dynamic)인 것을 의미하며 이것을 확률과정(stochastic process)이라 할 수 있고, 특수한 형태의 일종인 마코프과정(markov process)이다. 마코프성질에 의하면 미래는 현재의 조건하에서 과거와는 독립적이다. 따라서 마코프과정은 현재상태를 알고 있으면 과거와는 상관없이 장래의 확률분포를 알 수 있음을 의미한다. 특히 이산상태의 마코프과정을 마코프사슬(markov chain)이라 한다.

* 유일엔지니어링 부설 연구소장

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

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

본 연구에서는 월PDSI자료를 기초로 하여 자료의 시작년, 시작월인 1906년 1월에서 2월, 2월에서 3월, …, 12월에서 1월 등 1999년까지 등급에 의한 전이행렬을 구하였다. 시간인자는 임의의 월을 의미하며 이때의 상태공간은 $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 을 의미한다. 따라서 상태공간이 이산 형 Markov chain이 된다. n 월의 i 등급에서 $(n+1)$ 월의 j 등급으로 전이 될 때 $P_{ij}^{(n, n+1)}$ 로 표시되는 전이확률에서 시작월의 상태공간 7개 등급 확률을 나타내는 초기 등급벡터 $f^{(n)}$ 가 규정되면 Markov chain으로 표현할 수 있으며 이 행렬은 연편차가 없는 주기성을 갖는 것으로 가정할 수 있다. 왜냐하면 전이확률은 연이 아닌 월에 총속되기 때문이다. 전이확률의 조건부확률은 식(1)과 같이 표시할 수 있으며, 전이확률은 식(2)로 표현된다. 만약 $N_i^{(n)}$ 에서 임의의 i 등급발생 횟수가 0이면 $j = 1, 2, \dots, 7$ 의 모든 등급에 $P_{i,j}^{(n, n+1)} = 1/7$ 로 정의된다.

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

$$P_{i,j}^{(n, n+1)} = N_{i,j}^{(n, n+1)} / N_i^{(n)} \quad (2)$$

월 정상상태확률(monthly steady state probabilities)에서 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. 본 연구에서는 전이확률을 이용하여 목포지역의 월 정상상태확률을 산정하였다. 표 2에서는 목포지역의 94개년에 대하여 월등급 발생횟수에 대한 경험적 확률과 월 정상상태확률을 보여주고 있다. 여기서 경험적 확률은 월등급의 발생횟수를 94개년으로 나누어 각각을 구한 값이며 월 정상상태확률은 식(3)에 의해 구한 안정적인 확률이다.

$$\text{row}[Month_{n+1}] = \text{row}[Month_n][P_n] \quad (3)$$

표 2. 경험적 확률과 월 정상상태확률

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

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.

3. 가뭄관리를 위한 의사결정 방법

목포지역의 가뭄관리를 위한 단계별 의사결정은 의사결정분기분석(decision tree analysis) 기법을 이용하였다. 의사결정분기분석은 의사결정문제를 시각적으로 표현할 수 있고, 계산과정을 종합적으로 표현할 수 있는 유용한 방법이다. 즉, 가뭄의 심화정도에 따라 가뭄을 관리할 때 월등급별로 복잡하고 다양한 의사결정 문제를 몇 개의 사상으로 분해하여 단순화할 수 있는 장점이 있다. 가뭄관리의 등급은 5등급으로 하였고 가뭄관리는 5월에서 9월로 결정하였다. 가뭄관리의 시작 월인 5월까지의 월누가강수량 분석은 Sharma(1997)의 가뭄빈도공식에 의하여 산정된 정규분포형의 5년 빈도 가뭄에 해당되는 연강수량이 837.8mm보다 적은 18개 가뭄년에 의하여 1월부터 5월 까지 누가강수 부족량을 산정하였고, 76개 비가뭄년의 1월부터 5월까지 누가강수량대비 가뭄년의 1월부터 5월까지 누가평균강수량에서 같은 기간 가뭄년의 누가평균강수량을 뺀 값이 누가강수부족량이 된다. 표 3에서 보는 바와 같이 누가강수부족량은 가뭄년을 비가뭄년과 대비하여 그 값을 구하며, 부족량은 비가뭄년의 누가평균강수량 325.5mm에서 가뭄년의 같은 기간에 대한 누가평균강수량 249.2mm를 뺀 값인 76.3mm로 산정되었다.

표 3. 1월부터 5월까지 비가뭄년 대비 누가강수부족량
(단위 : mm)

구 분	범 위	평 균	누가강수부족량
가 봄 년	141.4 ~ 477.7	249.2	76.3
비가뭄년	138.9 ~ 628.2	325.5	-

그림 1에서 보는 바와 같이 분기도의 전개는 5월 5등급에서 다음 단계인 6월에 4등급, 5등급 및 6등급으로 전개되고 6월의 4등급은 다시 7월에 2등급, 3등급, 4등급, 5등급 및 6등급으로 전개된다. 분기도의 시점은 어떤 월, 어떤 등급에서 시작하여도 분기도 작성이 가능하다. 그러나 시작월의 경우 5월말 모내기가 끝나고 6월부터 용수수요가 많아지는 점을 고려하여 5월부터 분기도를 전개하였다. 분기도의 시작 등급은 가뭄상태인 5등급, 6등급 혹은 7등급 중에서 5등급으로 결정하였다. 왜냐하면 6등급 혹은 7등급은 이미 가뭄의 감시단계를 지나 적절한 대책을 수립하여야 할 단계일 것이며, 5월에서 6등급 혹은 7등급에 의하여 전개되어도 6월 혹은 7월로 전개되면서 5월의 5등급과 합쳐지기 때문이다. PDSI의 등급은 토양수분 상호작용에 의한 물리적으로 표현된 지수인 반면, 비가뭄년 월평균강수량 대비 월강수부족량을 부수적인 가뭄감시방법으로 의사결정분기도에 나타내면 정량적인 가뭄분석이 가능할 것이다. 따라서, 가뭄관리기간 이전의 상황인 1월에서 5월까지 누가강수부족량이 비가뭄년의 평균강수량 325.5mm보다 76.3mm 적은 249.2mm인 경우와 5월의 등급이 5등급 이상일 경우에는 가뭄주의보 발령 여부를 신중히 고려하여야 할 것이다.

표 4. 잠재 강수심도에 의한 가뭄관리

(단위 : mm)

월	추계학적 등급	전이 확률	월강수부족량	잠재 강수심도	비가뭄년 월평균강수량	누가 강수량
5	5	-	-	-	-	-
6	5	0.50	-39.4	-19.7	164.9	125.5
	6	0.25	-79.7	-19.9		85.2
7	6	0.67	-54.6	-36.6	219.9	165.3
	7	0.33	-65.5	-21.1		154.4
8	6	0.33	-11.2	-3.7	178.8	167.6
	7	0.33	-146.6	-48.4		32.2
9	7	1.00	-51.2	-51.2	147.7	96.5
제		0.0553	-332.1	-156.1	711.3	379.2

그림 1. 의사결정분기도

4. 의사결정분기도에 의한 가뭄의 관리

본 연구대상지역에 대한 가뭄의 감시와 관리는 그림 1과 같은 의사결정분기도에 의하여 결정할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 의사결정분기도에서는 5월의 5등급에서 가뭄관리를 시작하여 9월에 종료되며 여기에는 다음 월로 전이되는 등급과 이에 대한 전이확률 및 각 단계별 등급에 대한 월강수 과부족량 등의 정보를 보여 주고 있다. 이를 보면, 5월의 5등급에서 6월의 4등급, 5등급 및 6등급으로 전이되며 이 때의 전이확률은 각각 0.25, 0.50, 0.25이며 각 등급에 대한 월강수 과부족량은 각각 1.5mm, -39.4mm, -79.7mm이다. 5월의 5등급에서 6월의 4등급으로 전이 된 경우의 월강수량은 비가뭄년 대비 1.5mm의 과우량으로 가뭄관리는 필요없다. 따라서 5등급과 6등급에 대하여 가뭄은 관리되어야 할 것이다. 5등급과 6등급의 경우 전이확률은 6등급 0.25에 비하여 5등급이 0.50으로 발생확률이 크나 강수부족량은 그 반대로 5등급 -39.4mm에 비하여 6등급은 -79.7mm이다. 또한 전이확률과 강수부족량을 동시에 고려한 잠재 강수심도는 5등급의 경우, 전이확률 0.50에 강수부족량 39.4mm를 곱하면 -19.7mm가 되고 6등급의 경우, 같은 방법으로 -19.9mm가 된다. 따라서 가뭄의 관리는 잠재 강수심도가 큰 5월의 5등급에서 6월의 6등급으로 전개되는 경로에 의하여 계획되어야 할 것이다.

표 4는 잠재 강수심도에 의하여 가뭄을 관리할 경우, 단계별 월 잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따라 그 때의 등급, 전이확률 월강수부족량, 가뭄진행에 따른 가뭄등급별 월강수량을 보여 주고 있다. 표 4에서 보는 바와 같이 잠재 강수심도에 의하여 분석된 가뭄관리기간인 5월부터 9월 까지 등급의 경로는 5-6-6-7-7이며, 가뭄관리기간동안 비가뭄년 대비 누가강수부족량은 -332.1mm로서 누가강수량은 379.2mm이고 이 때의 누가확률은 0.0553이며 누가 잠재 강수심도는 -156.1mm로 분석되었다. 또한, 1월부터 가뭄관리 종료월인 9월까지 누가강수부족량 등의 산정은 1월부터 5월까지의 비가뭄년 누가강수량 325.5mm보다 76.3mm 적은 가뭄년의 누가강수량 249.2mm를 더하면 된다. 즉, 1월부터 9월까지 가뭄년의 누가강수량은 628.4mm이고 비가뭄년 누가강수량 1036.8mm 대비 누가강수부족량은 408.4mm이다. 가뭄의 관리기간동안 표 4의 잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따르지 않을 경우, 즉 그림 8.1의 5월 5등급에서 6월의 5등급으로 전이되었다면 7월은 4등급, 5등급 및 6등급으로 전이되어 잠재 강수심도는 각각 22.8mm, -48.0mm, -34.2mm이므로 6월의 가뭄상황에서 7월의 가뭄대책은 잠재 강수심도가 -48.0mm로 가장 큰 5등급 발생에 대비하는 것이 가장 효과적이다. 또한, 가뭄관리기간동안 가뭄을 감시하던 중 6월은 4등급이하의 습윤상태에서 7월에 5등급이 발생하였다면 8월에서는 4등급, 5등급 및 6등급으로 전이 되므로 같은 방법으로 계산하면 가장 큰 잠재 강수심도는 6등급의 -34.8mm이므로 7월 시점에서 8월의 가뭄관리는 6등급으로 전이될 경우에 대한 가뭄대책이 필요할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 목표지역을 중심으로 가뭄관리기간동안 가뭄을 감시하고 관리를 하기 위하여 목포기상대 1906년부터 1999년까지 94개년의 월Palmer 가뭄심도지수(PDSI)를 산정하여 이를 7개의 추계학적 등급으로 분류하여 확률의 동적(dynamic) 측면을 고려한 Markov chain에 의하여 월 전이확률을 산정하였으며 전이확률이 여러 횟수 변환을 거친 다음 초기확률분포와 상관없이 일정

한 안정적인 해인 월 정상상태확률(monthly steady state probabilities)를 구하여 자료년에 대한 경험적 확률과 비교 분석하였다. 분석결과 확률값의 차이는 크지 않았으나 하절기 극심한 가뭄상태인 7등급의 경우 경험적 확률보다 월 정상상태확률이 커지는 성향을 보여주었다. 산정된 전이확률로 가뭄관리기간인 5월부터 9월까지의 가뭄관리, 감시를 위해 의사결정분기도 분석(decision tree analysis)을 실시하였으며 가뭄관리 기준은 1월부터 5월까지 누가강수량이 가뭄년의 평균누가강수량 249.2mm이하인 경우, 5월의 추계학적 등급이 5등급 이상인 경우 가뭄관리 기간중에도 5등급 이상이 발생하였을 경우이다.

가뭄의 관리는 그 심화정도에 따라 월강수부족량과 전이확률을 동시에 고려하는 잠재 강수 심도(potential precipitation severity)가 가장 큰 경로를 따라 가뭄에 대비하여 임의 월에서 다음 월로 가뭄의 진행 상황에 따라 가뭄대책의 의사결정은 5등급의 경우 제 1단계 조치는 가뭄의 주의보를 발령하여 자발적 절수를 유도하고 제 2단계 조치는 6등급 일 때 가뭄경보를 발령하여 불필요한 물사용을 억제하고 3단계 조치는 7등급으로 가뭄비상을 발령하여 제한급수, 강제 물배분 등의 3단계로 구분하여 제시하였다. 효율적인 가뭄관리를 위해서는 지속적인 기상자료 수집, 월PDSI 및 추계학적 등급 산정과 더불어 영산강 유역내 4개댐 저수율, 영산강 유출용적 등을 분석하여 부수적인 가뭄감시요소로 활용할 수 있을 것이며 또한 본 연구를 더욱 발전시켜 n 월에서 $(n+1)$ 월에 대한 월 강수량의 예측에 의한 가뭄관리의 연구가 이루어지면 더울 효과적인 가뭄대책의 수립이 가능할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- Isaacson, D. L., Madsen, R. (1976). "Markov Chains : Theory and Applications", John Wiley and Sons, New York.
- Karl, T. R. (1986). "The Sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z Index to Their Calibration Coefficients Including Potential Evapotranspiration", Journal 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", Journal 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.
- Sharma, T. C. (1997). "A Drought Frequency Formula", Hydrological Sciences, Vol 42, No. 6, pp. 803~814.
- 허선 (1997). "확률과정론", 청문각.