

가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구 :

2. 가뭄관리를 위한 의사결정 방법

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

2. Decision-Making Method for Drought Management

강인주* / 윤용남**

Kang, In Joo / Yoon, Yong Nam

Abstract

This study suggests a methodology of hydrologic decision making for the establishment of a standard of drought management from the drought analysis by the past drought history and for the drought monitoring and management according to drought processing. The construction and analysis of a decision tree diagram are performed and the step by step plan according to drought severity is suggested. Say, the decision tree diagram is constructed by the transition probability and quantity of monthly precipitation. Then the drought processing is investigated by the analysis of diagram and the 3-step of drought notice, drought warning, and emergency plan are established. The suggested methodology in this study can be used for the other area and the decision tree diagram be used by changing the diagram according to the utilization purposes. Also, the choice of monthly PDSI class and precipitation analysis can be performed by the continuous data supplement. And so, a new standard value by the modified diagram is provided and the continuous drought management will be possible.

keywords : drought management, decision making, transition probability

요 지

본 연구에서는 과거 가뭄분석에 의해 가뭄관리 기준을 설정하고 가뭄 진행 상황에 따라 가뭄을 감시 및 관리하는 의사결정 방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 의사결정분기도를 작성하여 분석을 수행하고, 가뭄의 정도에 따라 구체적인 단계별 조치방안을 제안한다. 즉, 월강수의 전이확률과 강수량에 의하여 의사결정분기도를 작성하여 분석을 수행함으로써 가뭄의 진행상황을 파악해 가뭄주의보, 가뭄경보, 가뭄의 비상대책 등 3가지의 단계별 조치기준을 설정하는 것이다. 본 연구에서 제안된 방법은 다른 지역에서도 이용이 가능할 뿐 아니라 목적에 따라 분기도를 변환하여 이용할 수도 있을 것이다. 또한 지속적으로 기상자료를 보완하여 월 Parmer 지수(PDSI)의 등급 선정과 강수량 분석을 수행할수 있어 보완된 의사결정분기도에 의한 기준값을 제공함으로써 지속적인 가뭄관리가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 가뭄관리, 의사결정, 전이확률

* (주)대경 ENC 전무이사

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

1. 연구배경 및 목적

가뭄은 단기적으로는 수개월, 장기적으로는 수년이 지속되면서 시작과 종료가 불분명하여 가뭄이 크게 진행된 후에야 그 상황을 인지하게 됨으로써, 그 피해가 커지는 성향을 가지고 있으며 공간적으로도 매우 넓게 분포되는 특징으로 인하여 가뭄의 감시와 관리는 매우 어려운 실정이다(최영진, 1995).

역사적 가뭄의 피해를 살펴보면 인도 서부 Gujarat 지방에서는 1899년부터 1901년까지 지속된 가뭄으로 주민의 15%가 기아로 사망하였고(이재수, 2000), 1970년대와 1980년대 초반 아프리카 북부지역에서 계속된 가뭄은 수많은 주민의 생계위협과 많은 사람들이 기아로 숨지게 되어 이 지역 국가경제를 어렵게 하였다(최영진, 1995). 미국 캘리포니아에서는 1986년부터 1992년까지 연속적으로 최악의 가뭄이 발생하여 주정부에서는 심각한 지역을 재해지역으로 선포하고 지원을 하였으나 농작물 수확량은 40% 이상 감소하였다(심재현, 1995). 우리나라에서는 1939년 전국적인 규모로 가뭄이 발생하여 쌀생산량의 37%가 감소되는 대흉작을 기록하였고, 1967년에서 1968년까지 지속된 가뭄은 쌀생산량의 18%를 감소시켰으며 이때의 가뭄이후 수리시설물의 확충은 급진전되었으나 1994년에서 1995년까지 지속적인 가뭄으로 인한 막대한 피해는 피할 수 없었다(농림부, 1995).

Changnon(1993)은 1932년부터 1992년까지 미국의 주요 가뭄연구를 분석한 결과, 7가지의 교훈을 보고 하였으며 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 큰 가뭄은 사회경제적 구조뿐만 아니라 자연환경 부분 등 전반에 걸쳐 악영향을 미친다.
- 2) 가뭄은 미국전역의 기후에 영향을 미치고 예측할 수 없는 요소이다. 더욱이 가뭄은 불규칙하게 발생하여 가뭄의 대비와 경감대책수립이 어렵다.
- 3) 가뭄대책은 두 가지 경우로 분류된다. 즉, 단기적 대책과 장기적 개선으로 분류되며, 단기적 대책은 가뭄기간 동안 비상대책의 한 방법이며, 장기적 개선은 댐 등 수공구조물을 건설하여 수혜자에게 안정적으로 용수를 공급하는 항구적인 가뭄해소 대책이다.
- 4) 60년대의 큰 가뭄을 겪은 결과, 다양한 대책이 마련되었으나 현재에도 가뭄의 위협에서 벗어나지 못하고 있다.
- 5) 내한성이 강한 작물의 신종개량과 지속적인 관

개개선에도 불구하고 큰 가뭄에 의한 농작물 피해로 인한 재산손실을 벗어나지 못하고 있다.

- 6) 가뭄과 관련된 수자원운영개선에 관한 문제들이 주(state) 단위로 지역화 되어있어 국가적 관심에서 벗어나는 경우가 있다.
- 7) 가뭄은 어디에나 존재하고, 모든 만물이 영향을 받으며, 어느 누구의 책임도 아니다.

Changnon(1993)의 7가지 교훈에서 보는 바와 같이 비록 과거부터 현재까지 장·단기 대책을 수립하여 가뭄에 대처하였음에도 불구하고 큰 가뭄이 도래하면 가뭄의 위협에서 벗어나지 못하는 실정이다. Bruins(1993)는 “정부는 미리 계획된 재해관리 프로그램 등을 수립하기보다는 비상시 대처방안으로 가뭄에 대처하고 있다.”라고 언급하였고, Wilhite(1993)도 “최근까지 정부는 가뭄의 대처계획에는 소홀하고, 비상대책방안을 선호한다.”라고 하였다. 국내의 경우(농림부, 1995), “가뭄 대책 중 막대한 예산을 투입하여 관정개발, 헬기에 의한 급수, 많은 인력을 동원하여 하상갈착, 소류지 준설 등 단기적인 가뭄대책은 경제성의 평가없이 정치적인 안정을 위해 전시적으로 시행되는 가뭄대책이다.”라고 언급하였다.

이와 같이, 비록 가뭄은 예측하기 어려운 자연현상이나 가뭄으로 인한 비상대책을 추진하기 이전에 과거의 가뭄을 평가하고 지속적으로 가뭄을 감시하여 초기에 경보하고 효율적으로 관리하면 그 피해는 최소화할 수 있을 것이다. 미국의 경우, 80년대 후반부터 지속된 최악의 가뭄피해 이후 캘리포니아 수자원국에서는 6단계 가뭄대책에 의하여 가뭄관리를 실시하고 있다. 여기에 포함된 내용은 1단계에서는 가뭄발생 사전단계로서 물 수요와 공급에 대한 자료와 가뭄관련 자료를 수집하고, 2단계는 가뭄피해 감소방안 수립, 3단계는 저수지 수위로서 가뭄심도를 결정하고, 4단계는 물수요 감소 프로그램 개발하며, 5단계는 가뭄계획이 필요하면 즉시 채택하여 이행하고, 6단계에서는 가뭄계획에 의하여 효과적으로 감시하여 필요하면 즉시 계획을 수정한다. 텍사스주에서는 가뭄관리를 4단계로 구분하여 1단계는 주민의 자발적인 절수를 유도하고, 2단계는 저수지의 정상수위 70%일 때 가뭄을 예보하고, 3단계는 저수지수위 50%일 때 가뭄경보를 발령하며, 4단계는 가뭄비상을 선포한다(건설교통부, 1995).

우리나라의 가뭄대책은 사전대책, 대책단계, 해결단계로 대별되며, 사전대책으로는 강수량, 저수지 저수율 등 기상분석을 실시하고 가뭄상습지 관리, 용수확보

책 추진, 용수절약 운동 순서로 추진된다. 대책단계는 가뭄우려단계, 가뭄확산단계, 가뭄심화단계 순으로 추진되며 가뭄우려단계에서는 양수장비 배정, 중장비지원과 기술지원단 현지파견, 농작물의 절수재배 등을 추진하고 가뭄확산단계에서는 지하수탐사 확대, 예산지원, 가뭄대책추진 체제로 전환되며, 가뭄심화단계에는 중앙지원반을 현지에 파견하여 지원하고 관정개발, 하상굴착, 간이보 등 용수원개발을 확대하고 양수장비와 인력을 총동원하여 급수를 추진한다. 해결단계에서는 영농대책이 포함된다. 또한 각 단계별로 행정기관 및 유관기관의 임무와 농업인의 임무를 규정하고 있다(농림부, 1999).

그러나, 합리적인 가뭄의 감시가 없을 뿐 아니라 가뭄을 관리할 수 있는 정량적인 분석에 의한 지수가 없기 때문에 가뭄의 기준설정은 막연한 실정이다. 즉, 가뭄이 진행된 이후 가뭄에 대한 정책 혹은 대책은 있으나 가뭄의 감시와 관리에 대한 정량적 지표가 없기 때문에 경험에만 의존할 수밖에 없다.

본 연구에서는 의사결정분기도에 의하여 가뭄을 관리하기 위하여 과거 가뭄분석에 의한 가뭄관리 기준설정과 가뭄진행 상황에 따라 가뭄을 감시하고 관리하기 위한 의사결정 방법을 제시하고 가뭄심화 정도에 따라 구체적인 단계별 조치방안을 제시하였다. 여기에는 가뭄진행상황에 따라 가뭄의 주의보, 가뭄의 경보, 가뭄의 비상대책 등 각 단계에 대한 조치 기준을 설정하였다. 본 연구에서 제안된 방법은 다른 지역에서도 이용이 가능할 뿐 아니라 목적에 따라 분기도의 시작월과 추계학적 등급을 변환하여 이용이 가능할 것이다. 또한, 지속적으로 기상자료를 분석하여 월 PDSI의 등급 선정과 강수부족량을 분석하고 갱신함으로써 의사결정분기도는 보완할 수 있을 것이며, 분기도에 의하여 가뭄을 관리할 때, 그 결과에 의하여 기준값의 제공이 가능할 것으로 판단된다.

2. 가뭄관리를 위한 의사결정분기도의 작성 및 분석

2.1 작성 순서

목포지역의 가뭄관리를 위한 단계별 의사결정은 의사결정분기도 분석(decision tree analysis) 기법을 이용하였다. 의사결정 분기도는 의사결정문제를 시각적으로 표현할 수 있고, 계산과정을 종합적으로 표현할 수 있는 유용한 방법이다. 즉, 가뭄의 심화 정도에 따라 가

뭄을 관리할 때 월등급별로 복잡하고 다양한 의사결정 문제를 몇 개의 사상으로 분해하여 단순화할 수 있는 장점이 있다(Winston, 1994; 조덕운, 1998). 의사결정 분기도의 작성 순서를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 목포기상대의 월PDSI(Palmer Drought Severity Index)의 전이확률을 구하며, 강수부족량을 파악하기 위해서는 가뭄년과 비가뭄년에 대한 월강수량을 구한다.
- 2) 가뭄관리의 시작월을 결정하고, 이 때의 등급을 결정한다. 또한, 1월부터 시작월까지의 비가뭄년 대비 가뭄년에 대한 강수부족량을 산정한다.
- 3) 가뭄관리의 종료월을 결정한다.
- 4) 의사결정분기도를 작성한다. 이 때 월등급의 전이확률에 추가하여 월강수량에 대한 비가뭄년 대비 분기도 단계별 월강수의 과부족을 산정하여 가뭄관리의 부수적 요소로 활용할 수 있다. 즉, 임의 월등급이 다음 월에서 임의 등급으로 전이되었을 때, 그 때의 월강수량과 비가뭄년 월평균강수량을 비교하면, 단계별 강수 과부족량이 산정될 수 있고 이 값을 누가 하면 가뭄관리기간에 대한 누가 강수 과부족량이 산정되므로 가뭄의 심화 정도를 파악할 수 있는 정보를 제공해 줄 수 있을 것이다.

2.2 가뭄년과 비가뭄년 산정

가뭄년과 비가뭄년 산정은 목표지역의 연강수량자료를 이용하여 가뭄의 크기를 정량화하기 위한 가뭄빈도분석에 의하였다. 본 연구에 적용된 가뭄빈도공식은 Chow(1951)의 홍수빈도계수법($Q_T = Q_m + K_T \cdot \sigma_Q$) 형태인 sharma(1997)에 의하여 제시된 방법으로 산정하였으며, 5년 가뭄빈도보다 큰 가뭄을 가뭄년으로 선정하였으며 가뭄빈도공식의 적용절차를 간단히 설명하면 다음과 같다.

- 1) 연강수량계열을 작성한다.
- 2) 연강수량계열에서 가뭄빈도공식의 적용에 사용될 통계학적 매개변수인 평균(x_m), 표준편차(σ_x), 변동계수(c_v), 왜곡도계수(c_s), 1차 자기상관계수(ρ)를 계산하고, 적합도검정을 χ^2 -test와 K-S test 등에 의하여 정규분포, 대수정규분포, Gamma 분포 중 적정 확률분포형을 선정한다.
- 3) 선정된 확률분포형과 가뭄의 정의에 적합한 절단수준(장기간 평균, x_m)에 따라 가뭄발생확률 q ($= P(x_i < x_m)$)를 계산한다. 표준정규분포일 경우

분위수에 따른 확률을 얻기가 용이하므로 먼저 절단수준을 표준정규분포일 경우의 값으로 환산하여야 한다. 각 분포형은 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

① 정규분포 : $q = 0.5, z_m = 0$ (1)

② 대수정규분포 : $q = P(z_i < z_{ml}), z_{ml} = 0.5[\ln(1 + c_v^2)]^{0.5}$ (2)

③ Gamma분포 : $q = P(z_i < z_{mg}), z_{mg} = 0.333c_v$ (3)

여기서, z_m, z_{ml}, z_{mg} 는 표준정규분포의 값으로 환산된 각 분포형의 절단수준이다.

4) T년의 재현기간을 가지는 최대가뭀의 기간 $E(L_T)$ 을 계산한다.

① 최대가뭀기간을 산정하기 위해서는 특정해에 가뭀이 들었을 때 다음 해에도 가뭀이 될 조건부확률 r 이 필요하며 절단수준 z_0 는 분포형에 따라

z_m, z_{mg}, z_{ml} 을 사용하여야 하며, 일반적으로 연강수량은 수문학적 지속성을 가지지 않으므로 계산의 편의를 위하여 $r = q$ 를 사용하더라도 큰 오차는 없다.

② 평균재현기간 T년인 최대가뭀기간의 기대값 $E(L_T)$ 은 포아송분포를 따르는 기대시간(또는 대기시간)을 산정하는 방법과 동일하며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$E(L_T) = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot p(L_T = j) = 1 \cdot p(L_T = 1) + 2 \cdot p(L_T = 2) + \dots + 10 \cdot p(L_T = 10) + \dots$$
 (4)

즉, T년의 재현기간을 가지는 최대 가뭀의 길이는 3년에서 10년 사이이므로 $j = 1, 2, 3, \dots, T$ 년의 T가지 경우의 수가 존재하며, 일반적으로 재현기간 100년의 최대 가뭀의 기간 10년을 넘지 못하므로 발생확률

표 1. 목포지역의 가뭀년과 가뭀빈도

(단위 : mm)

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계	강우 부족량	빈도 (년)
1907	29.1	6.5	16.0	74.9	113.7	110.4	295.3	51.1	26.6	50.8	26.7	10.5	811.6	283.8	5
1912	13.5	70.4	32.3	87.6	46.0	42.8	110.3	227.8	11.5	38.9	35.1	45.3	761.5	333.9	5
1913	69.3	5.0	1.3	77.1	92.9	118.7	81.8	76.1	40.8	56.1	21.4	41.1	681.6	413.8	10
1929	19.4	24.7	15.7	51.5	30.1	148.4	51.0	96.7	95.1	13.5	34.8	96.2	677.1	418.3	10
1932	26.0	43.7	18.2	81.4	105.8	122.7	28.7	267.6	12.9	14.4	25.7	74.8	821.9	273.5	5
1935	26.7	37.6	27.5	82.1	89.9	64.0	38.9	172.7	95.8	62.1	50.1	19.1	766.5	328.9	5
1939	37.8	31.7	58.6	58.5	44.5	88.0	52.9	207.9	96.0	59.0	65.1	2.2	802.2	293.2	5
1942	48.9	36.6	125.5	62.7	80.2	36.7	42.0	39.7	163.2	17.9	18.2	16.4	688.0	407.4	10
1943	20.4	14.0	70.8	68.2	85.1	72.6	120.4	56.8	180.7	73.4	41.6	12.1	816.1	279.3	5
1955	17.6	52.8	24.6	33.9	30.9	56.3	345.4	139.5	58.4	11.2	49.6	14.5	834.7	260.7	5
1967	25.4	13.7	51.6	80.6	22.7	160.3	159.3	24.7	19.0	5.6	122.5	15.2	700.6	394.8	10
1968	6.0	5.1	69.4	67.2	28.9	35.7	49.7	175.6	86.9	112.4	66.7	28.7	732.3	363.1	10
1973	56.7	38.7	5.5	104.8	89.7	55.1	109.9	51.5	150.5	89.8	11.4	26.2	789.8	305.6	5
1977	11.0	7.5	92.9	235.9	130.4	96.3	68.9	39.0	23.5	5.9	54.5	21.1	786.9	308.5	5
1988	20.9	17.7	53.1	45.2	124.9	151.9	146.7	60.8	19.4	1.9	18.6	14.2	675.3	420.1	10
1992	19.6	28.4	92.6	57.9	71.1	16.4	103.8	141.4	135.5	5.4	27.7	43.8	743.6	351.8	10
1994	27.9	20.9	15.6	29.3	73.9	80.3	14.9	193.8	27.3	145.8	48.3	39.0	717.0	378.4	10
1995	37.8	30.8	30.0	72.3	53.5	140.6	107.9	65.1	32.7	10.4	19.0	13.1	613.2	482.2	30
평균	28.6	27.0	44.5	76.2	73.0	88.7	107.1	116.0	70.9	43.0	40.9	29.6	745.6	349.8	-
표준 편차	16.3	17.9	34.7	44.1	34.2	44.7	88.0	75.7	56.4	41.8	26.3	30.7	61.8	63.4	-

이 유의할 수준의 값을 갖는 경우도 대개 10년 이내 이다.

- 5) 최대가뭄의 가뭄강도 I 의 기대치는 확률분포형과 절단수준에 따라 일정한 것으로 가정하며 식 (5)를 이용하여 계산한다.

$$E(I) = \mu_I = I = -\frac{e^{-\left(\frac{-z_0}{2}\right)}}{q\sqrt{2\pi}} - z_0 \quad (5)$$

- 6) 평균 재현기간 T 년의 가뭄빈도계수 (F_T)는 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$F_T = [E(D_T) - cv^{-1}] = [I \cdot E(L_T) - cv^{-1}] \quad (6)$$

- 7) 평균 재현기간 T 년의 최대가뭄의 심도 (S_T)를 홍수빈도공식의 형태인 식 (7)에 의하여 계산한다.

$$S_T = x_m + F_T \cdot \sigma_x \quad (7)$$

본 연구에서는 목포지역의 가뭄년을 표 1과 같이 선정하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 정규분포형의 5년 빈도 가뭄에 해당되는 837.8mm보다 연강수량이 적은 18개년을 가뭄년으로 채택하였다. 목포기상대 94개 자료년 중에서 18개 가뭄년을 제외한 76개년을 비가뭄년으로 정의하였다. 또한, 18개 가뭄년의 연평균강수량은 745.6mm로 전년 평균강수량 1095.4mm의 68%정도에 불과하였고, 목포기상대 관측 이래 가장 큰 가뭄은 1995년의 연강수량 613.2mm로서 전년 평균강수량 56%에 불과하며 30년 가뭄빈도에 해당된다. 76개 비가뭄년의 연평균강수량 1,178.2mm는 전년 평균강수량보다 82.8mm가 많게 분석되었다.

2.3 가뭄관리의 추계학적 등급과 시작 및 종료 월 결정

가뭄관리의 등급은 5등급으로 하였다. 왜냐하면 강인주와 윤용남(2002)의 연구에서 알 수 있듯이 4등급 이

하인 경우는 정상상태, 혹은 습윤상태이므로 별도의 가뭄관리가 필요없기 때문이다. 또한, 가뭄관리의 시작월은 5월로 결정하였다. 왜냐하면 모내기 시작이 북부지방은 5월 중순, 남부지방은 5월 하순경에 모내기가 시작되고 모내기가 끝나면 6월부터는 용수수요가 크기 때문이다. 가뭄관리의 종료월은 9월로 결정하였다. 9월 하순에는 추수기에 접어들어 용수수요는 급격히 감소하게 된다. 따라서 9월말은 농작물의 추수기인 점을 감안하면 가뭄관리 종료월로 결정할 수 있다.

월별 5등급 발생횟수와 발생률은 표 2에서 보는 바와 같이 5등급이 발생한 194회에서 가뭄관리기간 중 최대 발생은 7월에 22회 발생하여 전체의 11.3%에 해당된다. 가뭄관리기간인 6월부터 9월까지 4개월 동안 5등급은 76회가 발생하여 전체의 39.2%를 차지하였다. 가뭄관리 기간동안 이러한 현상의 원인은 기온이 높은 여름동안 무강수일수가 지속될 경우, 높은 증발산으로 인한 수분의 손실이 크기 때문에 가뭄으로 분류되는 5등급이 많이 발생하였을 것이다.

2.4 1월부터 5월까지 누가강수부족량 분석

가뭄관리의 시작월인 5월까지의 월누가강수량 분석은 목포지역의 가뭄년에 대하여 1월부터 5월까지 누가강수 부족량을 산정하였고, 비가뭄년의 1월부터 5월까지 누가강수량대비 가뭄년의 1월부터 5월까지 누가강수량에서 같은 기간 가뭄년의 누가평균강수량을 빼 값이 누가강수부족량이 된다. 목포지역의 경우 가뭄년의 1월부터 5월까지 누가강수량이 가장 적은 해는 1929년으로 141.4mm에 불과하였고, 누가강수량이 가장 큰 해는 1988년의 477.7mm이며, 누가강수량의 평균은 249.2mm로 산정되었다. 특히, 1988년의 누가강수량 477.7mm는 전년평균 누가강수량 310.9mm를 훨씬 상회하였으나 전년 대비 강수량은 매우 적게 발생하여 연강수

표 2. 추계학적 5등급의 발생횟수와 비율

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
횟수	17	17	11	8	4	14	22	20	20	22	22	17	194
비율(%)	8.8	8.8	5.7	4.1	2.1	7.2	11.3	10.3	10.3	11.3	11.3	8.8	100.0

표 3. 1월부터 5월까지 비가뭄년 대비 누가강수부족량

(단위 : mm)

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

량은 675.3mm로서 가뭄년에 해당되었다.

또한, 비가뭄년은 1월부터 5월까지 누가강수량의 범위는 누가강수량이 가장 적은 1978년의 138.9mm부터 가장 많은 1956년의 628.2mm까지이고, 누가평균강수량은 325.5mm로 나타났다. 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.

2.5 의사결정분기도 분석

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. 여기서 6월 4등급이 7월로 전이되는 전체 60회 중 2등급으로는 5회, 3등급으로는 11회, 4등급으로는 28회, 5등급으로는 15회, 6등급으로는 1회가 전이되었다. 그러나, 2등급과 6등급 전이확률의 경우 전체 전이횟수 60회 중 5회와 1회로 각각에 대한 전이확률은 0.08과 0.02에 불과하므로

분기도를 보다 단순화하기 위하여 전이확률 0.10 미만은 분기도작성에서 제외하였다.

또한, 분기도의 시점은 어떤 월, 어떤 등급에서 시작하여도 분기도 작성이 가능하다. 그러나, 본 연구에서는 시작월의 경우, 5월말 모내기가 끝나고 6월부터 용수 수요가 많아지는 점을 고려하여 5월부터 분기도를 전개하였다. 분기도의 시작 등급은 가뭄상태인 5등급, 6등급 혹은 7등급 중에서 전개되어야 할 것이다. 본 연구에서는 분기도 전개의 등급을 5등급으로 결정하였다. 왜냐하면 6등급 혹은 7등급은 이미 가뭄의 감시단계를 지나 적절한 대책을 수립하여야 할 단계이기 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.

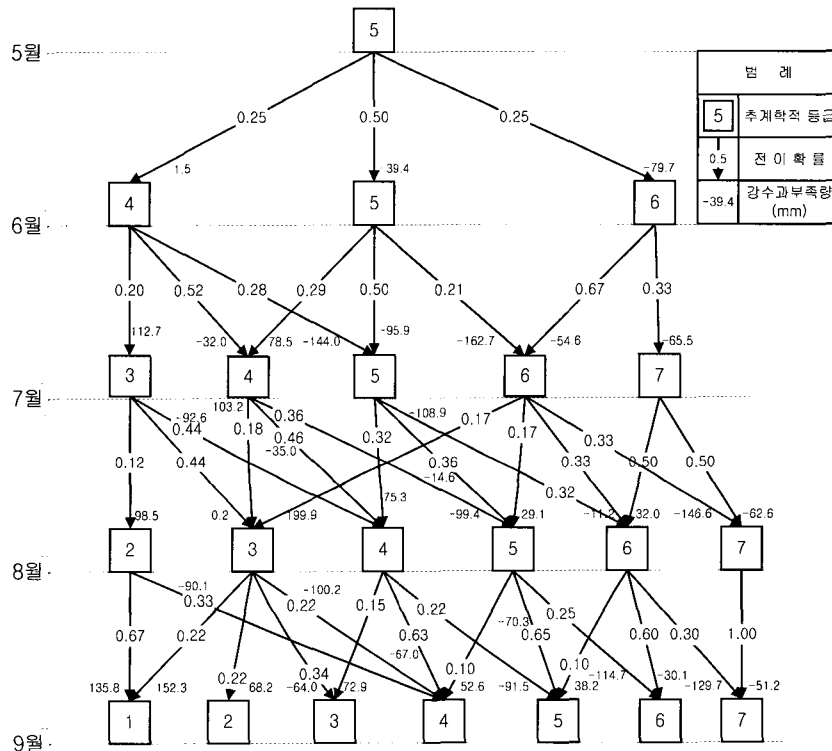


그림 1. 의사결정분기도

그림 1에서 보는 바와 같이 5월의 5등급에서 6월 4등급, 5등급 및 6등급으로 전이되었으며, 전이횟수는 각각 1회, 2회 및 1회로 전이되어 25%, 50% 및 25%의 전이확률을 가진다. 예를 들어 6월에 4등급으로 전이된 경우에 대한 월강수과부족량 계산은 1936년 6월 강수량은 166.4mm이고, 비가뭄년 6월 평균강수량은 164.9mm이므로 이들 두 값을 빼면 강수 과잉량인 +1.5mm가 된다. 5월의 5등급에서 6월의 5등급으로 전이되는 횟수는 2회로서 여기에는 1907년 6월의 월강수량 110.4mm인 경우와 1995년 6월의 월강수량 140.6mm인 경우이므로 두 해의 6월 강수량을 평균하면 125.5mm이고 이 값을 비가뭄년의 6월 평균강수량 164.9mm에서 빼주면 월강수과부족량은 그림 1의 -39.4mm가 된다. 또한 6월 4등급에서 7월 4등급으로 전이횟수는 28회이므로 28개 해당년의 7월 강수량을 합하며 28로 나누어주면 7월 4등급 월평균강수량이 산정되고 이 값을 비가뭄년의 7월 평균강수량에서 빼주면 7월 4등급에 대한 월강수 -32.0mm가 산정된다. 같은 방법으로 그림 1의 5월부터 9월까지 의사결정분기도의 전개 경로를 따라 가뭄이 진행될 경우, 가뭄관리 종료월인 9월까지 누가강수과부족량을 산정할 수 있다.

예를 들어 가뭄기간 동안 표 2의 5월 5등급에서 시작하여 6월에서 9월까지 6월 5등급, 7월 6등급, 8월 7등급, 9월 7등급으로 전이될 경우, 그 경로는 5-5-6-7-7이며 누가확률은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$P = [6월 = 5; 7월 = 6; 8월 = 7; 9월 = 7 | 5월 = 5]$$

$$= P_{36}^{MayJun} P_{67}^{JunJul} P_{78}^{JulAug} P_{89}^{AugSep}$$

$$= 0.50 \times 0.21 \times 0.33 \times 1.00 = 0.0347$$

또한, 6월에서 9월까지 누가강수부족량은 6월 39.4mm, 7월 162.7mm, 8월 146.6mm, 9월 51.2mm로서, 5월에 가뭄관리를 시작하여 종료월인 9월까지 누가강수부족량은 399.9mm가 된다.

표 4는 가뭄관리기간 동안 그림 1의 의사결정분기도의 각 경로에 대한 누가확률과 누가강수과부족량 및 누가확률과 강수부족량을 고려한 잠재 강수심도(potential precipitation severity)를 보여 주고 있다. 여기서 잠재 강수심도는 각 월에서 다음 월로 전이되는 전이확률에 해당월의 강수과부족량을 곱하여 누가한 값으로 정의된다. 예를 들어 분기도경로 5-5-6-7-7에 대한 누가 잠재 강수심도 P_s 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_s = P_{36}^{MayJun} \times (-79.3) + P_{67}^{JunJul} \times (-54.6)$$

$$+ P_{78}^{JulAug} \times (-146.6) + P_{89}^{AugSep} \times (-51.2)$$

$$= 0.5 \times (-39.4) + 0.21 \times (-162.7) + 0.33$$

$$\times (-146.6) + 1.00 \times (-51.2)$$

$$= -153.4\text{mm}$$

표 4에서 누가강수부족량이 습윤상태 즉, +값인 경우는 가뭄관리가 필요 없을 것이다. 그러나, 비록 분기도 경로 5-5-6-3-1과 5-5-6-3-2는 9월까지 누가강수량이 습윤상태 일지라도 5월 5등급에서 가뭄관리는 시작되므로 이 때부터 가뭄을 지속적으로 감시되어야 하며 8월은 습윤상태인 3등급으로 전이되었기 때문에 가뭄경보는 해제되어야 할 것이다. 가뭄이 어떤 경로를 따라 진행할 경우, 각 월에서 강수부족량을 구하기 위해서는 표 3에서 산정된 비가뭄년 대비 1월에서 5월까지 누가강수부족량 76.3mm를 더해 주어야 한다. 예를 들어 그림 1의 5-5-5 경로를 따라 7월말까지 강수부족량은 $76.3 + 39.4 + 95.9 = 211.6\text{mm}$ 가 된다.

또한, 표 4는 그림 1의 의사결정분기도의 가뭄기간 동안 분기도 경로별 누가확률, 누가강수부족량, 누가 잠재 강수심도를 보여 주고 있다. 표 4에서 보는 바와 같이 누가확률이 가장 큰 경로는 5-5-5-5-5이며, 이 때의 누가확률은 0.0585이다. 또한 가뭄의 크기가 가장 큰 경우인 누가강수부족량이 가장 큰 경로는 5-5-6-7-7로서 누가강수부족량은 399.9mm이고 이 때의 누가확률은 0.0347이다. 그러나 가뭄관리기간 동안 누가확률이 가장 큰 경로와 누가강수부족량이 가장 큰 경로에 의한 가뭄대책은 안정적인 수는 있으나 이 경우 비경제적이기 때문에 가장 효과적인 가뭄대책은 분기도경로에 따른 누가확률과 누가강수부족량을 모두 고려한 누가 잠재 강수심도에 의하여 가뭄의 대책을 수립하는 것이 가장 효과적인 방법일 것이며 누가 잠재 강수심도가 가장 큰 경로는 5-6-6-7-7이며 그 값은 -153.4mm로 분석되었다.

본 연구에서 제안된 의사결정분기도는 다른 지역에서도 같은 방법으로 산정하여 적용 될 수 있으며, 가뭄관리의 대상과 목적에 따라 시작월과 등급을 변화시켜서도 적용이 가능할 것이다. 또한 지속적으로 기상자료를 추가하고 이에 따른 월 PDSI의 등급과 강수부족량을 분석하여 의사결정분기도를 보완하면 효율적인 가뭄의 관리가 가능할 것이다.

표 4. 분기도경로별 누가확률, 누가강수부족량 및 누가 잠재 강수심도

1월에서 9월 분기도경로	누가확률	누가강수 부족량 (mm)	누가 잠재 강수심도 (mm)	1월에서 9월 분기도경로	누가확률	누가강수 부족량 (mm)	누가 잠재 강수심도 (mm)
5-4-3-2-1	0.0040	348.5	125.7	5-5-4-5-6	0.0131	-175.0	-61.4
5-4-3-2-4	0.0020	122.6	5.0	5-5-5-4-3	0.0120	12.9	32.6
5-4-3-3-1	0.0048	266.7	56.5	5-5-5-4-4	0.0504	-127.0	-85.8
5-4-3-3-2	0.0048	182.6	38.0	5-5-5-4-5	0.0176	-151.5	63.7
5-4-3-3-3	0.0075	50.4	1.2	5-5-5-5-4	0.0090	-97.3	67.6
5-4-3-3-4	0.0048	14.2	1.0	5-5-5-5-5	0.0585	-220.2	-118.6
5-4-3-4-3	0.0033	94.5	-6.9	5-5-5-5-6	0.0225	-264.6	-101.6
5-4-3-4-4	0.0139	-45.4	-60.0	5-5-5-6-5	0.0080	-282.4	106.3
5-4-3-4-5	0.0048	-69.9	-38.0	5-5-5-6-6	0.0480	-274.3	120.6
5-4-4-3-1	0.0051	225.0	35.8	5-5-5-6-7	0.0240	373.9	-141.4
5-4-4-3-2	0.0051	140.9	17.3	5-5-6-3-1	0.0039	150.1	13.6
5-4-4-3-3	0.0080	8.7	-19.4	5-5-6-3-2	0.0039	66.0	4.9
5-4-4-3-4	0.0051	-27.5	-19.7	5-5-6-3-3	0.0061	-66.2	-41.6
5-4-4-4-3	0.0090	7.4	-21.4	5-5-6-3-4	0.0039	-102.4	-41.9
5-4-4-4-4	0.0377	-132.5	-74.6	5-5-6-5-4	0.0018	-120.4	-43.7
5-4-4-4-5	0.0132	-157.0	-52.5	5-5-6-5-5	0.0116	-243.3	94.6
5-4-4-5-4	0.0047	-77.3	-46.8	5-5-6-5-6	0.0045	-287.7	-77.6
5-4-4-5-5	0.0304	-200.2	-97.7	5-5-6-6-5	0.0035	-175.1	-53.7
5-4-4-5-6	0.0117	-244.6	-80.7	5-5-6-6-6	0.0208	-243.4	-75.6
5-4-5-4-3	0.0034	5.7	-4.9	5-5-6-6-7	0.0104	-343.0	96.5
5-4-5-4-4	0.0141	-134.2	-58.1	5-5-6-7-7	0.0347	-399.9	153.4
5-4-5-4-5	0.0049	-158.7	-36.0	5-6-6-3-1	0.0063	217.9	11.0
5-4-5-5-4	0.0025	-104.5	-39.9	5-6-6-3-2	0.0063	133.8	-7.5
5-4-5-5-5	0.0164	227.4	-90.9	5-6-6-3-3	0.0097	1.6	44.3
5-4-5-5-6	0.0063	-271.8	-73.9	5-6-6-3-4	0.0063	-34.6	44.6
5-4-5-6-5	0.0022	-213.2	-71.0	5-6-6-5-4	0.0028	-52.6	46.3
5-4-5-6-6	0.0134	-281.5	-92.9	5-6-6-5-5	0.0185	-175.5	97.3
5-4-5-6-7	0.0067	-381.1	-113.7	5-6-6-5-6	0.0071	-219.9	80.2
5-5-4-3-1	0.0057	294.6	55.1	5-6-6-6-5	0.0055	107.3	56.4
5-5-4-3-2	0.0057	210.5	36.6	5-6-6-6-6	0.0332	-175.6	78.3
5-5-4-3-3	0.0089	78.3	-0.1	5-6-6-6-7	0.0166	-275.2	99.1
5-5-4-3-4	0.0057	42.1	-0.4	5-6-6-7-7	0.0553	-332.1	-156.1
5-5-4-4-3	0.0100	77.0	-2.1	5-6-7-6-5	0.0041	-75.0	21.7
5-5-4-4-4	0.0420	-62.9	-55.2	5-6-7-6-6	0.0248	-143.3	43.6
5-5-4-4-5	0.0147	-87.4	-33.2	5-6-7-6-7	0.0124	-242.9	64.5
5-5-4-5-4	0.0052	-7.7	27.5	5-6-7-7-7	0.0413	-259.0	-124.0
5-5-4-5-5	0.0339	-130.6	-78.4	계	1.0000	-	-

3. 의사결정분기도에 의한 가뭄의 관리와 단계별 대책

3.1 과거 가뭄분석에 의한 가뭄관리 기준

연구대상지역의 가뭄관리기간은 언급한 바와 같이 모네기가 시작되는 5월부터 추수기인 9월까지로 하였다. 가뭄이 시작되어 농업용수수요가 급격히 증가하는 6월부터 효율적인 가뭄관리를 위해서는 이에 대한 기준이 설정되어야 할 것이다. 그 기준은 첫째, 1월부터 5

월까지 누가강수량이 비가뭄년 누가평균강수량 대비 가뭄년의 누가평균강수량 249.2mm 이하인 경우, 둘째, 5월의 추계학적 등급이 5등급 이상인 경우, 셋째 가뭄관리기간 중에도 5등급 이상이 발생하였을 경우이다. 이와 같은 기준에 부합되기 위해서는 지속적으로 기상자료를 수집하여 월강수부족량과 월 PDSI 산정 등을 수행함으로써 의사결정분기도를 보완하고 지속적으로 가뭄을 감시하여야 할 것이다.

표 5. 1월에서 5월까지 비가뭄년 대비 누가강수량 부족년

연 도	5월까지 누가강수량(mm)	1월부터 9월까지 등급	비 고	연 도	5월까지 누가강수량(mm)	1월부터 9월까지 등급	비 고
1907	240.2	5-5-5-5-5-4-5-5	가뭄년	1962	245.7	3-4-4-4-4-4-5-4-3	
1909	238.6	4-4-4-4-4-5-5-4-4		1965	228.6	6-6-6-6-6-7-7-6-7	
1913	245.6	5-5-5-5-4-5-5-6-6	가뭄년	1967	194.0	5-5-5-5-6-6-6-7-7	가뭄년
1917	173.2	4-4-4-4-4-4-5-4-4		1968	176.6	7-6-6-6-6-7-7-7-7	가뭄년
1919	176.2	3-4-4-4-4-4-4-4-4		1970	239.0	4-4-4-4-4-4-4-4-4	
1924	236.7	4-4-4-4-4-4-4-5-5		1978	138.9	7-6-6-6-7-5-5-5-5	
1925	203.5	4-4-4-4-4-4-4-3-3		1981	149.9	4-4-4-4-4-4-4-4-4	
1929	141.1	4-4-4-4-4-4-5-6-6	가뭄년	1982	224.1	4-4-4-4-4-5-4-5-5	
1936	235.6	5-5-5-5-5-4-3-1-1		1984	241.8	4-4-4-4-4-4-4-4-4	
1939	231.1	4-4-4-4-4-5-6-5-5	가뭄년	1993	237.2	5-5-5-5-5-6-6-3-4	
1940	140.4	5-5-5-5-6-4-4-4-4		1994	167.6	4-4-4-4-4-5-6-6-7	가뭄년
1944	176.2	6-6-6-6-6-6-7-6-5		1995	224.4	5-5-5-5-5-5-6-6-7	가뭄년
1947	220.6	3-3-3-4-4-4-3-4-4		1996	239.8	7-7-6-6-6-4-3-4-4	
1955	159.8	4-4-4-4-4-5-4-4-5	가뭄년	1997	230.3	4-4-4-4-4-4-4-3-4	

표 6. 5월 5등급 이상인 연도

연 도	5월부터 9월까지 분기도경로	5월까지의 누가강수량 (mm)	연강수량 (mm)	비 고	연 도	5월부터 9월까지 분기도경로	5월까지의 누가강수량 (mm)	연강수량 (mm)	비 고
1907	5-5-4-5-5	240.2	811.6	가뭄년	1967	6-6-6-7-7	194.0	700.6	가뭄년
1936	5-4-3-1-1	235.6	1610.6		1968	6-7-7-7-7	176.6	732.3	가뭄년
1940	6-4-4-4-4	140.4	1182.5		1978	7-5-5-5-5	138.9	1023.9	
1943	6-7-7-7-7	258.5	816.1	가뭄년	1993	5-6-6-3-4	237.2	1082.2	
1944	6-6-7-6-5	176.2	938.1		1995	5-5-6-6-7	224.4	613.2	가뭄년
1965	6-7-7-6-7	228.2	840.9		1996	6-4-3-4-4	239.8	1040.9	

표 5는 목포지역의 1월부터 5월까지 누가강수량 249.2mm 이하인 해의 누가강수량과 1월부터 9월까지 등급을 보여 주고 있다. 표 5에서 보는 바와 같이 누가강수량이 가장 적은 해는 1978년의 138.9mm이고 여기에 해당되는 28개년 중 9개년이 가뭄년으로 32%에 해당된다.

또한, 1월부터 9월까지 4등급 이하로 지속되는 경우도 있으나, 누가강수량은 비가뭄년에 비하여 76.3mm 이상 부족하기 때문에 가뭄의 감시와 관리는 필요할 것이다. 1936년의 경우, 1월부터 9월까지 등급의 경로는 5-5-5-5-5-4-3-1-1로서 가뭄상태에서 습윤상태로 전환되는 6월말에 가뭄의 경보는 해제하여도 될 것이다. 1924년과 1962년의 경우에는 4등급 이하의 정상상태에서 7월 또는 8월에 5등급의 가뭄상태로 전환되었다. 이 경우는 지속적인 가뭄감시 중 5등급으로 전환된 해당월에서 가뭄의 관리가 이루어져야 할 것이다. 또한 4등급 이하로 지속된 1919년, 1925년, 1947년, 1970년, 1984년 및 1997년의 경우는 1월부터 5월까지 누가강수량 249.2mm 이하이기 때문에 지속적으로 가뭄은 감시되어

야 할 것이다.

표 6은 가뭄관리의 시작월인 5월의 5등급 이상인 연도에 대하여 5월부터 9월까지의 등급경로와 그 해의 1월부터 5월까지 누가강수량 및 그 해의 연강수량을 보여주고 있다. 표 6에서 보는 바와 같이 1943년 258.5mm를 제외하고는 표 4의 누가강수량 부족년과 중첩되며, 5월의 5등급 이상인 해 12개년 중 가뭄년은 5개년으로 46%에 해당되었다.

1936년, 1940년, 1993년 및 1996년의 경우는 언급한 바와 같이 가뭄상태에서 습윤상태로 전환되는 해당월에 가뭄의 경보를 해제하여도 될 것이다. 그러나 5월 등급이 6등급 혹은 7등급인 경우는 즉각적인 가뭄경보가 발령되어 가뭄의 관리에 들어가야 할 것이다.

목포지역에서 가장 큰 가뭄년인 1995년의 경우, 누가강수량은 224.4mm로서 비가뭄년의 평균누가우량 325.5mm보다 101.1mm가 부족하였으며 이 때의 등급은 5등급이었고 5월에서 9월까지 등급경로 5-5-6-6-7로 나타났다. 이 경우, 의사결정권자가 3개월 정도 앞선 1995년 5월경에 가뭄을 경보하고 적절한 가뭄대책을 수립하여 효율

표 7. 잠재 강수심도에 의한 가뭄관리

(단위 : mm)

월	추계학적 등 급	전이확률	월강수 부족량	잠재 강수심도	비가뭄년 월평균강수량	누가강수량
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
계		0.0553	-332.1	-156.1	711.3	379.2

적으로 가뭄을 관리하였을 경우, 그 피해는 최소화될 수 있었을 것이다.

3.2 가뭄의 감시와 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.

표 4에서 언급한 바와 같이 전이확률과 등급에 대한 월강수부족량을 동시에 고려할 수 있는 월잠재 강수심도(potential precipitation severity)에 의하여 가뭄을 관리하는 것이 가장 경제적인 것이다. 따라서 가장 큰 각 단계별 잠재 강수심도에 의하여 가뭄을 관리하는 방안을 제시하고자 하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 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 전이된 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 강수 부족량은 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 관

리는 잠재 강수심도가 큰 5월의 5등급에서 6월의 6등급으로 전개되는 경로에 의하여 계획되어야 할 것이다.

표 7은 잠재 강수심도에 의하여 가뭄을 관리할 경우, 단계별 월 잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따라 그때의 등급, 전이확률 월강수부족량, 가뭄진행에 따른 가뭄 등급별 월강수량을 보여 주고 있다. 표 7에서 보는 바와 같이 잠재 강수심도에 의하여 분석된 가뭄관리기간인 5월부터 9월까지 등급의 경로는 5-6-6-7-7이며, 가뭄관리기간동안 비가뭄년 대비 누가강수부족량은 -332.1mm로서 누가강수량은 379.2mm이고 이 때의 누가 확률은 0.0553이며 누가 잠재 강수심도는 -156.1mm로 분석되었다. 또한, 1월부터 가뭄관리 종료일인 9월까지 누가강수부족량 등의 산정은 1월부터 5월까지의 비가뭄년 누가강수량 325.5mm보다 76.3mm 적은 가뭄년의 누가 강수량 249.2mm를 더하면 된다. 즉, 1월부터 9월까지 가뭄년의 누가강수량은 628.4mm이고 비가뭄년 누가강수량 1036.8mm 대비 누가강수부족량은 408.4mm이다.

가뭄의 관리기간동안 표 7의 잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따르지 않을 경우, 즉 그림 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, 가뭄관리 기간동안 가뭄을 감시하던 중 6월은 4등급이하의 습윤 상태에서 7월에 5등급이 발생하였다면 8월에서는 4등급, 5등급 및 6등급으로 전이되므로 같은 방법으로 계산하면 가장 큰 잠재 강수심도는 6등급의 -34.8mm이므로 7월 시점에서 8월의 가뭄관리는 6등급으로 전이될 경우에 대한 가뭄대책이 필요할 것이다.

표 8은 그림 1의 의사결정분기도에서 가뭄관리기간

표 8. 누가 잠재 강수심도 100.0mm 이상인 분기도 경로

순 위	5월에서 9월까지 분기도경로	누가 잠재 강수심도 (mm)	누가강수부족량 (mm)	누가확률
1	5-6-6-7-7	-156.1	-332.1	0.0553
2	5-5-6-7-7	-153.4	-399.9	0.0347
3	5-5-5-6-7	-141.4	-373.9	0.0240
4	5-6-7-7-7	-124.0	-259.0	0.0413
5	5-5-5-6-6	-120.6	-274.3	0.0480
6	5-5-5-5-5	-118.6	-220.2	0.0585
7	5-4-5-6-7	-113.7	-381.1	0.0067
8	5-5-5-6-5	-106.3	-282.4	0.0080
9	5-5-5-5-6	-101.6	-264.6	0.0225

동안 누가 잠재 강수심도 100.0mm 이상인 분기도경로, 누가확률 및 누가강수부족량을 보여 주고 있다. 표 8에서 보는 바와 같이 여기에 해당되는 가뭄은 9개 사상이며 이는 가뭄관리기간 중 가뭄을 감시할 때, 임의의 월 가뭄상태에서 다음 월 가뭄상태로 전이될 확률과 강수 부족량을 고려된 가뭄사상의 경로이다.

3.3 가뭄의 단계별 대책

가뭄에 대한 수자원관리는 단기적인 대책으로 물수요를 감소시키는 방법과 장기적인 대책으로 물공급을 증대시키는 방법으로 대별할 수 있다. 장기적인 대책은 구조적 대책으로서 댐 등 수공구조물을 건설하여 수혜자에게 장기적으로 안정적인 용수를 공급하는 항구적인 가뭄해소방안이다. 그러나 단기적 대책은 가뭄기간 중 비상대책의 한 방법으로 물사용 규제, 급수차 등 비상용수공급 등의 가뭄관리방안이 여기에 속한다.

Mays 등(1999)은 PDSI 등의 가뭄지수심도를 위험도로 지수화함으로써 도시상수도 가격을 위험도의 함수로 표현하여 가뭄기간동안 상수도가격의 탄력적 운영안을 제시하였다. 즉, 위험도는 물의 수요가 공급을 초과하는 확률로 표현되며 수문학적 재현기간과 관련하여 물의 수요와 공급은 기대값에 대한 확률분포형으로 표현될 수 있다. 일반적으로 재현기간이 커짐에 따라 가용공급량과 예상수요량은 차이가 나며 수요량이 가용공급량을 초과하는 지속적인 가뭄기간동안은 가격을 지속적으로 상승시킴으로서 수요량을 감소시키는 가뭄관리 방법을 제시하였다. 미국의 경우, 가장 일반적으로 이용되는 가뭄의 감시지표는 저수지수위, 지하수위, PDSI 등에 의하며, 참고로 캘리포니아 수자원의 가뭄대책 6단계 계획은 다음과 같다(건설교통부, 1995).

1) 1 단계 : 공급과 수요에 대한 자료와 가뭄에 관한

자료가 수집하여 다양한 가뭄조건에서 용수이용 가능량을 파악하고 그 양을 추정하며, 가뭄발생의 전 단계이다.

- 2) 2 단계 : 가뭄피해 감소방안으로 물공급증대와 물 수요감소방안의 선정이다.
- 3) 3 단계 : 급수와 수요의 예측으로 가뭄의 심도를 결정하며 가뭄심도 결정은 저수지 수위가 그 지표이다.
- 4) 4 단계 : 물수요 감소 프로그램 개발
- 5) 5 단계 : 가뭄계획이 필요하다고 결정되면 즉시 채택하여 이행한다.
- 6) 6 단계 : 가뭄계획의 이행결과의 효과를 감시하고 필요하면 수정한다.

본 연구에서는 가뭄의 감시와 관리를 위해서는 그림 1의 의사결정분기도에 의하여 가뭄의 심화단계별 조치 기준을 설정하였다. 즉, 1단계 조치로는 1월부터 5월까지 누가강수량이 249.2mm 이하이거나 5월에 5등급 이상 또는 가뭄관리기간 중에도 5등급 이상이 발생할 경우, 가뭄주의보를 발령하고, 그 대책으로는 가용용수원의 최대한 확보와 절수 운동을 홍보하여 주민들의 자발적인 물절약을 유도한다. 가뭄이 심화되어 등급이 6등급으로 전이될 경우, 2단계 조치로 가뭄경보를 발령하고 물수요 저감조치 등으로 불필요한 물의 사용을 억제한다. 7등급으로 가뭄이 심화되었을 때는 3단계 조치로 가뭄비상발령과 급수차가동, 제한급수, 강제 물배분 등의 조치를 취할 것을 제안한다.

4. 결 론

본 연구에서는 목표지역을 중심으로 가뭄관리기간동안 가뭄을 감시하고 관리를 하기 위하여 의사결정분기도

분석(decision tree analysis)을 실시하고, 가뭄의 심화 정도 분석은 월강수부족량과 전이확률을 동시에 고려하는 잠재 강수심도(potential precipitation severity)에 의하여 임의 월에서 다음 월로 가뭄의 진행 상황에 따라 가뭄대책의 의사결정을 위한 단계별 방안을 제시하였다. 또한, 의사결정분기도에 의하여 가뭄의 심화단계별 조치 기준을 3단계로 구분하여 제시하였으며 이와 같은 연구 과정을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 확률의 동적 측면을 고려한 마코프연쇄에 의하여 추계학적 등급이 n 월의 i 등급에서 $(n+1)$ 월의 j 등급으로 전이될 전이확률을 이용해서 가뭄관리기간인 5월부터 9월까지 가뭄의 관리와 가뭄감시를 위하여 의사결정분기도 분석을 제안하였다. 의사결정분기도를 구축할 때, 시작월은 농번기가 시작되는 5월로 결정하였고 이때의 추계학적 등급은 가뭄상태인 5등급으로 하였다. 그러나 지속적으로 가뭄을 감시하여 가뭄관리기간 중 습윤상태에서 가뭄상태인 5등급 보다 클 경우도 가뭄관리의 시작월이 될 수 있다. 또한, 가뭄관리의 종료월은 농번기가 끝남으로서 용수수요가 급격히 감소하는 9월로 하였다.

둘째, 의사결정분기도 분석에 의하여 추계학적 등급별로 복잡하고 다양한 의사결정문제를 몇 개의 사상으로 분해하여 단순화할 수 있으며 분기도에 전이확률과 등급에 따른 월강수부족량을 표시하여 분기도의 경로별 단계별 가뭄진행 감시가 가능하므로 효율적인 가뭄관리를 할 수 있다. 효율적인 가뭄관리를 위해서는 가뭄관리 시작월에 대한 기준이 설정되어야 하며, 그 기준은 1) 1월부터 5월까지 누가강수량이 가뭄년의 평균누가강수량 249.2mm 이하인 경우, 2) 5월의 추계학적 등급이 5등급이상인 경우, 3) 가뭄관리기간 중에도 5등급 이상이 발생하였을 경우이다. 이와 같은 기준에 부합되기 위해서는 지속적으로 기상 자료를 수집하여 월강수부족량과 월 PDSI 산정 등을 수행함으로써 의사결정분기도를 보완하고 지속적으로 가뭄을 감시하여야 할 것이다.

셋째, 의사결정분기도에서 단계별 가뭄의 감시와 관리의 전이확률과 등급에 대한 월강수부족량을 동시에 고려할 수 있는 월잠재 강수심도에 의하여 가뭄을 관리하는 방안을 제시하였다. 즉, n 월 i 등급에서 다음 월인 $(n+1)$ 월 j 등급으로 전이되었을 때 월잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따라 가뭄은 관리되어야 하며 만일, 가뭄관리중 $(n+1)$ 월에 잠재 강수심도가 가장 큰 경로가 아닌 다른 경로로 전이되었을 때에도 다음 월에 대한 가뭄 대비는 의사결정분기도에서 잠재 강수심도가 가장

큰 경로를 따라 가뭄을 대비하여야 할 것이다. 또한 가뭄관리기간 중 습윤상태에서 가뭄상태인 5등급으로 전이되었을 경우 역시 다음 월에 대한 가뭄 대비는 잠재 강수심도가 가장 큰 경로를 따라야 할 것이다.

넷째, 효율적인 가뭄관리를 위해서는 가뭄심도의 정량적 분석에 의하여 가뭄심화 정도에 따라 단계별 조치 기준이 수립되어야 할 것이다. 본 연구에서는 가뭄관리를 위한 단계별 조치 기준의 내용은 5등급의 경우, 1단계 조치로는 가뭄의 주의보를 발령하고 주민의 자발적 절수요 운동, 가용 용수원 최대확보 등이 여기에 속하며 2단계 조치는 가뭄이 심화되어 6등급일 경우 가뭄경보를 발령하고 불필요한 물사용 억제와 물수요를 저감할 수 있는 방안을 조치하여야 한다. 3단계 조치는 가뭄이 심화되어 7등급일 경우, 가뭄비상을 발령하고 급수차 가동, 제한급수, 강제 물배분 등의 방안을 조치한다. 가뭄 감시를 수행함에 있어서 지속적으로 기상자료 수집, 월 PDSI 산정, 추계학적 등급 산정, 영산강 유역내 댐의 저수율, 영산강 유출용적 등의 분석이 이루어져야 하며 가뭄진행 정도에 따라 이를 부수적인 가뭄감시 요소로 활용하면 더욱 효율적인 가뭄감시와 관리가 될 것이다.

다섯째, 추후 연구과제로는 본 연구에서 제시된 동적 확률인 마코프연쇄의 전이확률로 작성된 의사결정분기도 분석을 통하여 가뭄을 관리하고 그 대책을 수립하는 방법을 더욱 발전시켜 n 월에서 $(n+1)$ 월에 대한 월강수량의 예측(forecasting)에 의한 가뭄관리의 연구가 이루어지면, 더욱 효과적인 가뭄대책의 수립이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강인주(2000). 가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구, 박사학위논문, 고려대학교.
- 강인주, 윤용남(2002). "가뭄빈도공식을 이용한 가뭄의 평가." 한국도시방재학회지논문집, 한국도시방재학회, 제2권, 제3호.
- 강인주, 윤용남(2002). "가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구 : 1. 마코프연쇄를 이용한 PDSI의 추계학적 거동분석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 583-595.
- 건설교통부(1995). 가뭄기록조사 보고서.
- 농림부(1995). '94, '95 가뭄극복.
- 농림부(1999). 농업재해대책 업무편람.

- 심재현(1995). “외국의 가뭄대응과 물 관련법.” **대한 토목학회지**, 대한토목학회, 제43권, 제5호, pp. 33-38.
- 이재수(2000). **자연재해의 이해**, 구미서관.
- 조덕운(1998). **OR개론**, 연경문화사.
- 최영진(1995). “가뭄의 원인과 예측.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제1호, pp.16-20.
- Bruins, H.(1993). *Drought Risk and Water Management in Israel : Olanning for the Future, in Donald A. Wilhite, Drought Assessment, Management and Planning : Theory and Case Studies*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Changnon, S.(1993). *Are We Doomed to Fail in Drought Management?, in Martin Ruess, Water Resources Administration in the United States : Polisy, Practice, and Emerging Issues*, Michigan State University Press, East Lansing : Michigan, pp.194-202.
- 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.
- Mays, L.W. and Ejeta, M.Z.(1999). *Urban Water Pricing and Drought management : A Risk Based Approach, Drought Management Planning in Water Supply Systems*, Kluwer Academic Publishers, pp.261-298.
- Sharma, T.C.(1997). “A Drought Frequency Formula.” *Hydrological Sciences*, Vol.42, No.6, pp. 803-814.
- Wilhite, D.A.(1993). *Planning for Drought : A Methodology, in Whilhite, Donald A. (ed), Drought Assessment, Management and Planning : Theory and case Studies*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, pp.87-108.
- Winston, W.L.(1994). *Operations Research : Applications and Algorithms*, Wadsworth Publishing Company, Boston, Belmont, California.

(논문번호:02-58;접수:2002.8.20/심사완료:2002.09.23)