

가뭄지수에 의한 가뭄관리 의사결정 연구

김치영*, 강경석**, 서병하***

1. 서론

가뭄을 분석하기 위해서는 가뭄에 대한 정의와 이를 정의하기 위한 지표가 필요하다. 그리고 가뭄의 진행상태나 심한 정도를 객관적으로 판단할 수 있으며, 이해하기 쉬운 수치가 요구된다. 이를 위해 지금까지 다양한 가뭄지수(drought index)가 개발되어 사용되고 있으며, 이들 가뭄지수 중 Palmer 가뭄심도지수(PDSI), 표준강수지수(SPI), 지표수 물공급지수(SWSI) 등이 널리 사용되고 있다.

한편 용수 수요는 증가하고 있는 반면 대규모 수자원 개발은 환경보전 요구로 인해 극히 어려운 상황이다. 또한 재해관리 순환 중 과거 위기관리(crisis management) 위주에서 위험도 관리(risk management)를 포함한 전 요소에 의한 재해관리 방향으로 급속히 선회할 필요가 있다. 따라서 수자원 개발의 구조적인 대책에 대한 지속적인 노력과 함께 물부족을 극복하기 위한 비구조적 대책의 일환으로 가뭄의 조기경보 및 효율적인 가뭄의 감시 및 관리로 가뭄 피해를 최소화할 필요가 있다.

본 연구에서는 가뭄이 빈번하게 발생하는 낙동강유역에 PDSI, SPI, 그리고 다양한 방법으로 산정해 사용되고 있는 SWSI를 적용하여 비교·검토하였다. 산정된 가뭄지수들의 특성과 과거 가뭄사상의 재현성을 평가하여 해당 유역에 유역단위 가뭄감시를 위해 적절한 가뭄지수를 선정하였다. 선정된 가뭄지수를 활용 가뭄등급을 분류하고, 분류된 가뭄등급의 추계학적 거동을 분석하기 위하여 Markov 연쇄모형을 사용하여 정상상태 확률을 구하고 추계학적 등급이 발생할 경험적인 확률과 비교하였으며, Markov 연쇄모형의 전이확률을 기반으로 의사결정 분기도(decision tree)를 작성하였다. 의사결정분기도는 의사결정자가 가뭄대책을 수립하는데 있어 유용한 기초자료가 될 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 PDSI

Palmer(1965)는 가뭄을 주어진 지점에서 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급보다 적은 수개월 또는 수년의 기간이 지속되는 현상으로 정의하였다. PDSI산정을 위한 입력자료는 강수량, 기온 및 유효 토양수분량으로 매우 단순하다. 그러나 지수를 얻기 위해서는 증발산량, 함양량, 유출량 및 손실량 그리고 잠재 증발산량, 잠재 함양량, 잠재 유출량 및 잠재 손실량을 수분수지 모형에 의해 계산하여야 한다.

2.2 SPI

Mckee(1993)는 강수량이 부족하면 용수공급원인 지하수량, 적설량, 저수지 저류량 토양 함유수분, 하천 유출량 등에 각기 다른 영향을 미친다는 것으로부터 SPI를 개발하였다. SPI는 다양한 지속기간 동안의 부족 강수량으로 산정되었으며 지속기간은 서로 다른 용수의 가뭄에 대한 영향을 반영한다. Mckee 등은 3, 6, 9, 12, 24, 48개월의 지속기간으로 SPI를 산정하였다.

SPI는 시간단위별 누적 강수 계열을 작성하고, 구해진 누적 강수계열을 이용하여 월별로 비초

* 한국건설기술연구원 수자원환경부 연구원
** 한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원
*** 인하대학교 건설공학부 교수

과확률을 산정하고, 이를 표준정규분포에 적용시켜 표준강수 지수를 산정한다. 유원희(2000)에 의하면 각 분포형별 지수 값이 차이가 거의 없는 것으로 나타났으며, Guttman(1999)에 의하여 Pearson Type III 분포가 적절한 분포형으로 제시되었다. 따라서 본 연구에서는 Pearson Type III 분포를 이용하여 SPI를 산정하였다.

2.3 SWSI

이 지수의 기본적인 개념은 각 인자들의 비초과 확률변수를 사용하는 것으로서, 다른 지역들에서도 용수공급 능력의 비교가 가능하다. 미국 서부지역에서 개발된 SWSI는 4개의 수문인자(적설, 강수, 유출, 저류량)의 비초과 확률에 가중치를 두어 식(1)과 같이 산정된다. (Mckee,1991)

$$SWSI = \frac{aP_{sn} + bP_{pr} + cP_{st} + dP_{re} - 50}{12} \quad (1)$$

여기에서

a, b, c, d 는 가중치이며, a+b+c+d = 1이다. P는 각 수문인자의 비초과 확률(%)이다. 식(1)에서 50을 빼는 것은 0에 가까운 값을 만들기 위한 방안이며, 12로 나누는 것은 PDSI와 유사한 값의 범위로 값을 제한하기 위한 방법이다. 비초과 확률은 비초과 확률(P)은 확률분포로부터 얻어진다.

SWSI는 유역의 용수 공급형태에 따라 다양한 방법에 의해 산정되고 있으며, 가중계수를 결정하는데에도 마찬가지로 유역의 상황에 따라 다른 방법들이 적용되고 있다. 본 연구에서 가중계수를 산정하기 위해 각각 수문요소의 월별평균치를 월별 평균치의 최대치로 나누어 무차원화 한 후 월별 수문요소의 상대기여도를 산정하여 사용하였다.(Mckee, 1991)

2.4 의사결정 분기도 기법

Wilhite(2000)는 그림1과 같은 재해관리 순환에서 과거 위기관리(crisis management) 위주의 재해관리에서 위험도관리(risk management)를 포함한 전요소에 의한 재해관리 방향으로 전환의 필요성을 제기하였다. 본 연구에서는 가뭄의 진행양상을 확률론적으로 판단할 수 있는 의사결정분

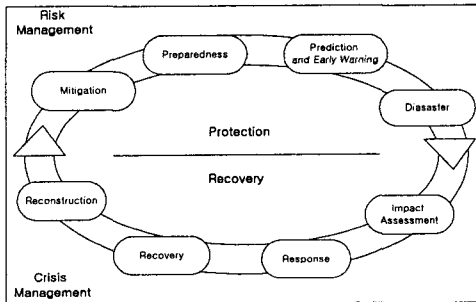


그림 1 재해관리 순환도(Wilhite, 2000)

기도(decision tree)를 제시하여 조기에 가뭄대책 수립이 가능한 방안을 제시하고자 한다.

많은 의사결정 문제에서 현재 취하고 있는 여러 활동들이 앞으로의 결정에 영향을 미친다는 점을 인식하는 것이 바람직한 경우가 많다. 종종 장기적인 효과를 고려하지 않고 결정이 내려지는 일이 생긴다. 이로 인한 결과로 처음에는 제대로 내려진 듯이 보이는 결정이 후속 결정시 의사결정자를 곤란한 지경에 빠지게 하곤 한다. 의사결정 문제에서 일련의 결정들이 중요시 되고 미래의 사건에 대한 확률이 알려져 있을 때 의사결정 흐름도(decision-flow

diagram) 또는 의사결정 분기도(decision tree) 분석은 매우 효과적인 기법이 된다.(김영휘 등, 1994)

본 연구에서는 의사결정 분기도 기법을 응용하여 가뭄관리 기간동안 각 월의 PDSI 등급을 분기점으로 하여 의사결정 분기도를 작성하였다. 즉 가뭄의 심화정도에 따라 가뭄을 관리한다고 하였을 때, 각 분기점이 되는 PDSI의 추계학적 가뭄등급이 시간 전개에 따라 가뭄등급이 천이할 확률을 Makov 연쇄를 이용하여 구하고, 이를 분기도에 나타내 가뭄의 전개 가능한 시나리오를 한 눈에 볼 수 있도록 하였다. 또한 정량적인 지표로서 부족적으로 부족 강수량을 표시하여 가뭄등급

의 전개양상에 따라 부족 강수량을 참조하도록 하였다. (Lohani, 1997)

3. 가뭄지수의 산정

본 연구에서는 낙동강유역의 가뭄지수를 산정하여 각 가뭄지수의 특성을 파악하고, 과거 가뭄년도와 실제 가뭄기간의 지수의 변동양상을 검토하여 낙동강 유역에 적절한 가뭄지수를 선정하고자 한다. 가뭄지수를 위하여 강수량 자료의 경우 1973년 ~ 1999년 자료를 활용하였다. SWSI 자료는 유역평균 강수량을 활용하였고, 유출량 계열의 획득을 위해 안동댐, 합천댐, 임하댐의 방류량 자료, Tank 모델에 의해 도출된 자연유출량 자료를 활용하였다. 저수량 자료는 낙동강 유역 안동댐, 합천댐 임하댐 저수량을 활용하였다.

3.1 PDSI

본 연구에서 낙동강 유역 21개 지점에 대하여 각 지점별 PDSI를 산정한 후 Thiessen가중 평균법으로 유역평균 PDSI를 계산하였다.(류재희 등, 2001) 계산된 PDSI의 결과를 그림(2)에 도시하였으며 결과에 의하면 과거 낙동강 유역에 발생한 1977년, 1981년 ~ 1982년, 1987년 ~ 1988년, 1994년 ~ 1995년 가뭄을 비교적 잘 표현하는 것으로 사료된다.

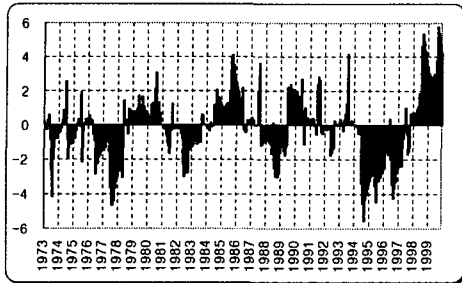


그림 2 낙동강 유역 PDSI

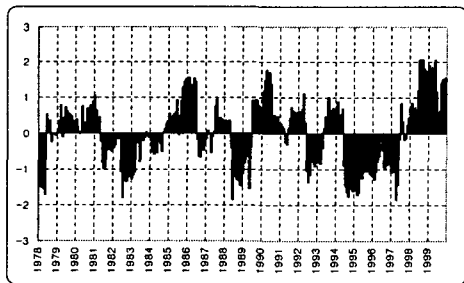


그림 3 낙동강 유역 SPI

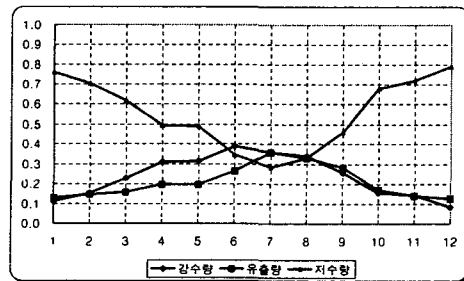


그림 4 수문요소별 가중계수

3.2 SPI

그림(3)은 10개월 지속기간에 해당하는 SPI를 나타낸 것이다. 예로 제시한 SPI-10개월 지속기간 지수 또한 과거 가뭄년으로 알려진 기간동안의 가뭄현상을 비교적 잘 모의하고 있다.

3.3 SWSI

본 연구에서 SWSI 산정을 위해 Normal, Log-Normal, Gamma-2 분포형을 이용하여 산정하였으며, 자료사용은 유출량 계열에서 방류량 계열, 자연유출량 계열, 그리고 유출량 계열을 제외한 SWSI를 산정하였다.

유출량 계열 작성을 위해서는 낙동강 유역을 대표하는 지점의 유출량 자료를 획득하여야 하나 실측 자료가 미비하여 신뢰성 있는 비초과 확률을 산정하기 어려웠다. 따라서 본 절에서는 각 댐의 방류량 계열 그리고 낙동강 유역에 소유역별로 산정된 Tank 모델에 의한 자연유출량을 합하여 유출량 계열을 획득하였다.

방류량 계열과 저수량 계열의 작성에 있어서는 각 댐의 방류량 및 저수량 자료계열을 분석한 뒤 월별 비초과확률을 산정하고, 각 댐의 년용수공급량을 가중치로 하여 유역을 대표하는 비초과확률을 산정하

었다(류재희, 2001).

또한 수문요소의 가중치 계산에 있어서는 각종 수문인자의 상대적인 기여를 평가하여 가중계수를 취하는 방법을 채택하였다(Mckee, 1991). 유역의 각 수문요소는 계절에 따라 그 기여도가 상이하다. 따라서 SWSI를 산정하는데 가중계수는 유역에 대한 각 수문요소 기여도의 계절적인 분포를 반영하고 있어야 한다. 본 연구에 사용한 방법은 미 Oregon 주에서 사용하고 있는 방법이다. 그림(4)는 낙동강 유역에 적용하여 산출한 가중계수의 값이다.

SWSI의 산정결과 그림(5)와 그림(6)에서 볼 수 있는 것과 같이 분포형별 차이는 미소하게 존재하기는 하지만 가뭄심도를 결정지을 만큼의 차이는 아니었다. 반면 그림(7)과 그림(8)에서 볼 수 있는 것처럼 적용된 자료와 관련해서는 일정한 차이를 나타냈다. 따라서 지수 값의 차이는 사용된 자료에 의한 것이 규정적인 것으로 볼 수 있다. 그러므로 SWSI 산정시 유역의 수문상황을 적절히 반영하기 위해서는 적절한 자료 선택이 매우 중요함을 알 수 있다.

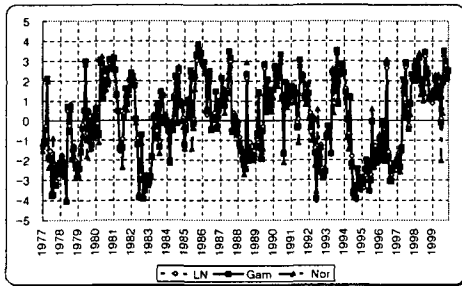


그림 5 분포형 차이에 따른 SWSI의 변화

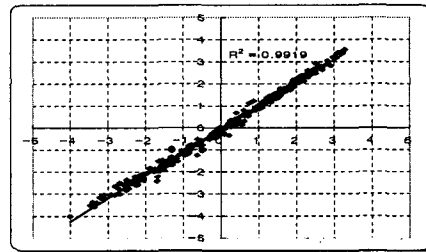


그림 6 분포형 차이에 따른 산포도 - 방류량계열(LN-Gam-2)

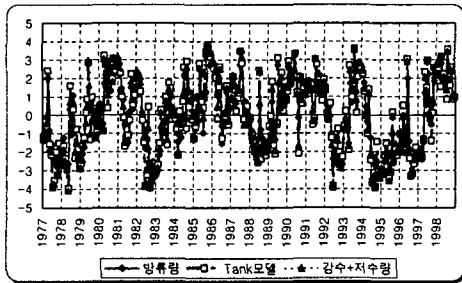


그림 7 유출량 자료에 대한 SWSI 차이 (Gama-2 분포)

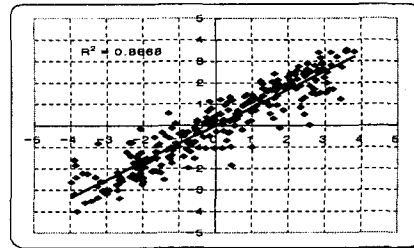


그림 8 유출량 자료에 따른 산포도(자연 유출량 : 방류량 계열)

3.4 가뭄지수 비교

위에서 산출한 각각의 가뭄지수들간의 상관분석을 시행한 결과 표1에서 볼 수 있는 것과 같이 PDSI와 SPI-10이 높은 상관성을 보이고, 그림 8에서 예시한 것과 같이 상대적으로 과거 가뭄상상을 잘 나타내는 것으로 나타났다. 또한 일시적인 강수에 따른 가뭄지수의 변동폭이 작아 안정적으로 가뭄상황을 반영한다고 할 수 있다.

이는 PDSI가 가뭄의 지속기간의 고려를 포함하고 있어 지속되는 가뭄 감시에 유리한 특징을 가지고 있기 때문이며, SPI-10개월의 경우 강수 누가에 의한 가뭄평가이기 때문에 지속기간이 고려된 상태이기 때문이다. 한편 SWSI의 경우 유역의 수문학적 상황을 종합적으로 고려할 수 있으며, 일시적인 강수에 의한 영향 및 저수량 효과를 포함하고 있어 단기 지속기간의 SPI 함께 단기

적인 가뭄감시에 유리하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 물리적인 현실성 표현에 매우 가깝고, 낙동강 유역에 적용해 보았을 때 과거 가뭄사상을 잘 반영하고, 안정적인 값을 갖는 PDSI를 낙동강 유역 대표 가뭄지수로 채택하고 이를 가뭄관리를 위한 의사결정에 활용하고자 한다.

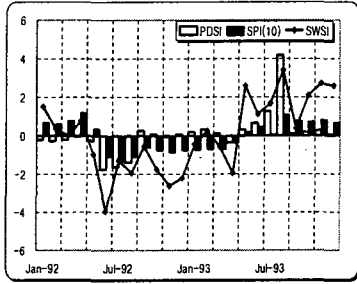


그림 9 92년 - 93년 가뭄

표1 각 가뭄지수 상관계수

		PDSI	SPI(1)	SPI(2)	SPI(3)	SPI(6)	SPI(9)	SPI(10)	SPI(12)
PDSI		1.000	0.418	0.513	0.602	0.746	0.832	0.836	0.825
L-N	방류량	0.769	0.432	0.445	0.524	0.723	0.804	0.793	0.769
	자연유출	0.784	0.597	0.576	0.597	0.731	0.768	0.748	0.711
	강수+저수	0.780	0.511	0.511	0.563	0.730	0.784	0.765	0.728
Gam -2	방류량	0.770	0.441	0.455	0.535	0.727	0.805	0.792	0.765
	자연유출	0.781	0.603	0.579	0.602	0.732	0.763	0.740	0.702
	강수+저수	0.781	0.524	0.523	0.573	0.736	0.783	0.764	0.723
Normal	방류량	0.743	0.425	0.440	0.520	0.706	0.784	0.763	0.733
	자연유출	0.760	0.586	0.557	0.583	0.715	0.749	0.716	0.685
	강수+저수	0.746	0.495	0.490	0.543	0.707	0.760	0.731	0.694

4. 가뭄관리를 위한 의사결정 방안

본 연구에서는 가뭄지수의 추계학적 변동을 분석하기 위하여 Karl(1986)에 의해 분류된 PDSI의 추계학적 7등급 분류에 의거 추계학적 가뭄등급을 분류하고, Markov 연쇄의 천이확률을 이용하여 의사결정 분기도를 작성하여 조기에 가뭄대책을 수립할 수 있도록 하였다.

Karl(1986)은 PDSI를 1등급에서 7등급으로 분류하였다. 분류된 등급분류를 활용하여 대구지점 PDSI 등급을 결정하였다. 천이확률 $P_{i,j}^{(n,n+1)}$ 은 n월에서 n+1월로 진행할 때 상태가 i등급에서 j등급으로 천이될 확률이다. 시작 월에 대한 일곱 등급의 확률로 설명되는 초기벡터 $f^{(0)}$ 는 정해진다. 91년간의 월 PDSI를 가지고 1월에서 2월, 2월에서 3월, ……12월에서 1월로 전환을 설명하는 12개월의 천이확률행렬이 대구지점에서 계산되어졌다.

$$\text{row}[\text{Month } n+1] = f_{n+1}^{(\infty)} = \text{row}[\text{Month}][P_n] \quad (2)$$

경험적으로 구해진 천이확률을 식 (2)에 적용하여 월 정상상태 확률을 구하였다. 여기에서 식의 우변항의 행벡터는 어떤 시작월의 어떤 등급을 적용하여도 동일한 값을 얻을 수 있다. 이의 결과는 초기값에 관계없이 안정적인 정상상태확률을 얻을 수 있음을 의미한다.(Lohani, 1997)

추계학적 천이확률을 이용하여 그림 9와 같이 의사결정 분기도를 작성하였다. 5월 5등급에서 6월 5등급으로 전개는 총 11회 중 8회가 전개되어 0.73의 확률을 갖으며, 6등급으로는 11회 중 2회가 전개되어 0.18의 천이확률을 갖는다. 7월 5등급에서 7등급으로는 14회 중 1회가 천이되어 0.07의 확률을 갖지만 의사결정 분기도의 단순화를 위하여 제외하였다.

의사결정 분기도 작성에 있어서 어느 월, 어느 등급으로부터 시작이 가능하나, 본 연구에서 시작월의 경우, 5월 말 모내기가 끝나고 6월부터 용수 수요가 급격히 증가하는 것을 고려하여 5월부터 전개하였다. 또한 5월 가뭄상태 등급이 5등급 이하인 경우는 별도의 가뭄관리가 필요 없을 것이며, 6등급, 7등급의 경우는 이미 적절한 가뭄대책을 확립해야 하는 단계이므로 분기도 전개에서 제외하였다.

PDSI가 토양수분 상호작용에 의한 물리적으로 표현된 지수이다. 따라서 지수는 직접적으로 부족을 정량적으로 표현하지는 않는다. 비가뭄년 월평균강수량 대비 월 강수부족량을 부수적인 가뭄

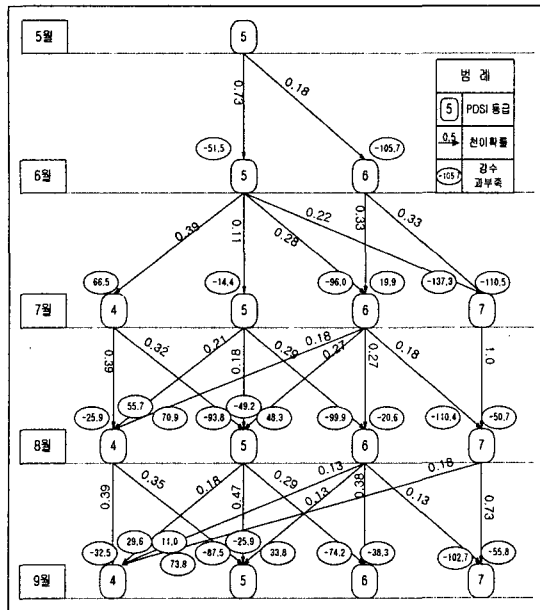


그림 10 의사결정 분기도

발생하는 경우도 많아 5월 5등급이 아닐지라도 지속적인 가뭄감시로 5등급 이상 진입하는 경우 가뭄단계에 대한 대책이 필요할 것이다.

5. 결론

본 연구에서 낙동강 유역에 PDSI, SPI, SWSI를 산정한 결과 PDSI와 10개월 지속기간의 SPI가 가장 높은 상관성을 나타냈고 SWSI의 경우 LN분포를 적용하여 구한 지수가 PDSI와 가장 높은 상관성을 나타냈다. 위에서 산정한 세 지수 모두 비교적 과거 가뭄사상을 잘 나타냈으며, 단지 SWSI의 경우 일시적인 강수에 민감한 반응을 나타내 짧은 지속기간의 SPI와 더불어 단기 가뭄감시에 유리할 것으로 판단된다. 또한 세계적으로 널리 사용되고 안정적인 값을 나타내는 PDSI를 이용하여 의사결정 분기도를 작성하였다. 분기도는 가뭄의 전개 가능한 시나리오를 한 눈에 볼 수 있도록 제시하여 가뭄대책을 조기에 수립하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 이후 각 수문요소의 예측에 대한 연구가 지속되어 가뭄감시에 활용된다면 보다 효과적인 가뭄대책을 수립할 수 있을 것으로 사료된다.

7. 참고문헌

류재희, 윤용남, 이동률, 안재현 (2001), "가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교연구", 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp 강인주, 윤용남(2001), "가뭄관리를 위한 수문학적 의사결정에 관한 연구", 한국수자원 학회 학술 발표회 논문집, 한국수자원학회, pp489-494
 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
 Mckee, T.B. and Garen, D.C(1991). *Development of a Surface Water Supply Index for the western United States*. Climo. Report 91-3, Dept of Atmos, CSU, Fort Collins, Co, November.
 Wihite, D.A. Hayes. M.J., (2000), "Planning for Drought : Moving From Crisis To Risk Management.", Journal of the American Water Resources Association, AWRA, Vol. 36.No4.
 김영휘 등(1996). 경제성 공학, 청문각

감시방법으로 의사결정분기도에 나타내면 가뭄등급의 천이확률에 의한 가뭄관리 뿐 아니라. 강수의 과부족에 의한 정량적인 관리가 가능할 것이다.

각 가능한 5월부터 9월로의 천이 경로에 따른 확률수준을 결정할 수 있으며, 확률수준은 아래와 같이 구할 수 있다. 예를들면 [5월 = 5 ; 6월 = 5 ; 7월 = 7 ; 8월 = 7 ; 9월 = 7]의 전개경로의 경우는 0.1175를 갖는다.

의사결정 분기도는 의사결정자에게 가뭄의 전개 가능성에 대한 확률을 제공함으로써 조기에 의사결정을 할 수 있도록 하여 가뭄피해를 최소화할 수 있는 가능성을 주고 있다.

본 연구에서 제안된 방법은 유연성이 있으므로 다른 월 다른 가뭄등급으로부터도 작성이 가능하다. 강수의 부족 혹은 과잉은 장기간의 과거자료를 가지고 수정될 수 있으며, 새로운 자료에 의한 확충을 하여야 할 것이다. 또한 앞에서 사례를 제시한 것처럼 가뭄이 7월 8월