

한강유역에서의 건기와 우기의 변이기간 분석

An Analysis of the Transition Time between Dry and Wet Period in the Han River Basin

이 재 수*

Lee, Jae Soo

Abstract

The surface hydrology of large watershed is susceptible to several preferred stable states with transitions between stable states induced by stochastic fluctuations. This comes about due to the close coupling of land surface and atmospheric interaction. An interesting and important issue is the duration of residence in each mode. In this study, mean transition times between the stable modes are analyzed for the Han River Basin. On the basis of historical data, the nonlinear water balance model is calibrated for the Han River Basin. The transition times between the stable modes in the model are studied based on the stochastic representation of the physical processes and on the calibrated model parameters. This study has implications for prediction of the transition time between stable modes or residence times, that is, the time the system spends in a given stable modes, since this would be equivalent to predicting the duration of drought or wet conditions.

Keywords : transition time, land surface-atmospheric interaction, non-linear water balance model, soil moisture content, crossing theory

요 지

대유역의 지표면 수문현상은 추계학적 변동에 의해 야기되는 안정된 상태의 변이와 함께 몇 개의 발생빈도가 높은 안정된 상태의 영향을 받기가 쉬운데 그 이유는 지표면과 대기 상호관계의 밀접한 조합과도 관계가 있다. 따라서 각 안정상태에서의 체류기간 즉, 가뭄이나 홍수기의 지속기간이 중요한 연구 과제라 할 수 있으며 본 연구에서는 한강유역에 대하여 안정상태의 평균 변이기간을 분석하였다. 비선형 물수지모형을 한강 유역에 대하여 과거의 자료를 바탕으로 검증하였고 모형을 통한 물리과정의 추계학적 표현과 산정된 모형변수들로부터 안정상태 사이의 평균 변이기간이 계산되었다. 본 연구는 안정상태 사이의 변이기간 혹은 거주기간, 즉 시스템이 주어진 안정상태에 머무는 기간(가뭄이나 홍수상태의 지속기간)의 예측과 밀접한 관계가 있다.

핵심용어 : 변이기간, 지표-대기상호관계, 비선형물수지모형, 함수비, 교차 이론

* 전주대학교 토목환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Jeonju Univ., Jeonbuk 560-759, Korea

1. 서 론

수문 및 수문기상학 분야에서 있어 가뭄지속기간의 산정은 중요한 관심사이며 또한 인간의 생활에 상당한 영향을 미치고 있다고 할 수 있다. 강우 자료의 시계열은 보통 수년에서 수십 년의 지속성을 가지며 가뭄기와 홍수기 사이에서 변이 함을 보여주고 있다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 가뭄기 또는 홍수기의 지속기간을 예측한다면 수자원관리에 많은 도움을 얻을 수가 있다. 한편 한강유역에 있어서 토양수분의 시간적 변화는 가뭄이나 홍수주기의 예측에 매우 중요하며, 가뭄 혹은 홍수의 발생에 영향을 주는 수문 순환과정의 원동력은 유역내의 인자와 외부인자에 의해 조절되어 지고 이에 대한 이해는 전체적인 기후양상과 국부(local) 영향사이의 관계를 알 수 있게 한다.

Rodriguez-Iturbe 등(1991a, b)은 대유역의 지표면 수문 현상을 분석하기 위한 통계-동력학적인 모형(statistical-dynamical model)을 제시했는데 이 모형은 물리학적 기본 요소를 가지고 있고, 강우의 국부재 순환(local feedback)에 대한 매개변수와 과정을 포함하고 있다. 그들은 추계학적 분석과 카오스(chaos) 이론을 이용한 분석을 통하여 모형을 분석하였으며, 물수지 방정식에서 추계학적 변동으로 인해 통계학적으로 구별되는 안정한 상태와 이들 상태간의 변이를 일으키기를 보여주고 있다. 안정상태 사이의 평균 변이기간(mean transition time)은 가뭄이나 홍수상태의 평균 지속기간을 예측하는데 도움을 주기 때문에 평균 변이기간을 예측하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 Rodriguez-Iturbe 등(1991a)에 의해 제안된 비선형 물수지 모형을 한강유역에 대해 검증하고 모형에 포함된 물리과정의 추계학적 표현과 산정된 변수를 기본으로 건조와 습한 기후의 안정상태 사이의 평균 변이기간을 분석하는데 있다.

2. 물수지모형의 기본내용

2.1 대유역에 대한 물수지 방정식

Rodriguez-Iturbe 등(1991a)에 의해 제안된 다음과 같은 확정론적 물수지 방정식은 대유역에서의 토양수분의 시간적 변화를 설명하고 시스템에서의 연속적인 수분의 유입과 유출을 모의한다.

$$\frac{ds(t)}{dt} = a \left(1 + \frac{s'(t)}{\Omega} \right) (1 - \varepsilon s^l(t)) - b s^c(t) \quad (1)$$

$$a = \frac{P_a(s)}{nZr} \quad \text{and} \quad b = \frac{E_p(s)}{nZr} \quad (2)$$

여기서 $s(t)$ 는 시간의 함수인 토양의 상대적인 포화(이하 함수비라 칭함), n 은 토양 공극률, Zr 은 토양의 수문학적 활동 깊이(L), $P_a(s)$ 는 이동 강우율(L/T), $E_p(s)$ 는 잠재 증발산율(L/T), Ω 는 재순환 계수, 그리고 c, r, ε 은 양의 수치 상수이다.

물수지 방정식에서 가장 중요한 변동은 강우에 의한 것인데, 강우와 관련하여 강우의 국부(local)요소는 외부의 이동(advective)요소보다 더 변동적이며 국부요소는 주위환경 변동에 영향을 받는다. Rodriguez-Iturbe 등(1991a)은 변수 $\alpha=1/\Omega$ 를 사용하여 주위환경 변동을 국부 강우 항에 도입하였는데 α 는 평균 $\bar{\alpha}$ 와 표준편차 σ 를 갖는 비상관 가우시안 잡음과정(uncorrelated Gaussian noise process)이다. 따라서 확정론적 물수지 방정식(1)로부터 다음과 같은 추계학적 미분 방정식을 얻을 수 있다

$$ds(t) = [a(1 - \varepsilon s^l(t)) + \alpha \bar{\alpha} s^c(t)(1 - \varepsilon s^l(t)) - b s^c(t)]dt + \alpha \sigma s^c(t)(1 - \varepsilon s^l(t))dW_t \quad (3)$$

여기서 dW_t 는 백색 잡음과정(white noise process)이다. 이 추계학적 미분 방정식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수가 있다.

$$ds(t) = G(s(t))dt + \sigma g(s(t))dW \quad (4a)$$

$$G(s(t)) = a(1 - \varepsilon s^l(t)) + \alpha \bar{\alpha} s^c(t)(1 - \varepsilon s^l(t)) - b s^c \quad (4b)$$

$$g(s(t)) = \alpha s^c(t)(1 - \varepsilon s^l(t)) \quad (4c)$$

이 비선형 추계학적 미분 방정식에서 함수 $G(\cdot)$ 는 주위환경의 변동이 없는 즉, 잡음의 영향이 없는 시스템의 확정론적 전개를 나타내고 함수 $g(\cdot)$ 는 주위환경의 무작위 변동을 고려하고 있다.

2.2 안정상태 사이의 평균 변이기간

Rodriguez-Iturbe 등(1991a)은 대유역의 지표면

수문현상은 잠움에 의해 야기되는 안정한 상태사이의 변이와 함께 몇 개의 구별되는 안정상태에 영향을 받음을 보여 주었는데, 우리에게 관심 있는 것은 각 안정상태에서의 거주기간(residence time)이라고 할 수가 있다. 작은 강도의 변동에서는 변이가 일어나지 않지만 강한 변동은 안정한 상태사이에 변이를 일으킬 것이므로 안정한 상태 사이의 평균 변이기간은 변동 강도에 의하여 지배를 받는다고 할 수가 있다. 변이기간의 통계학적 모델들은 Gardiner(1983)에 의해 주어진 기본 이론과 Demaree와 Nicols(1990)에 의해 사용된 방법을 사용함으로써 유도 할 수가 있다. Gardiner(1983)에 따르면 초기상태로부터 잠재 장벽(potential barrier) 즉, 한 상태에서 다른 상태로 변이 할 때 통과해야 할 장벽까지의 이동기간으로 정의되는 변이기간 T 의 n 차 모멘트 T_n 은 경계조건 문제를 적용함으로써 구할 수가 있다. 변이기간의 n 차 모멘트 T_n 에 대한 지배 방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$G(s)\frac{d}{ds}T_n(s) + \frac{1}{2}\sigma^2g^2(s)\frac{d^2}{ds^2}T_n(s) = -nT_{n-1}(s) \quad (5)$$

$$T_n(s=b_n)=0, \quad \left.\frac{dT_n(s)}{ds}\right|_{s=0}=0 \quad (6)$$

여기서 b_n 는 함수비의 정상상태(steady state) 확률 분포에서 두 개의 최대치(안정상태) 사이에 존재하는 최소 안정치 즉, 잠재 장벽에 해당하는 함수비의 값을 말한다. 건조와 습한 상태사이의 평균 변이기간은 $n=1$ 을 사용함으로써 구할 수가 있다.

$$G(s)\frac{d}{ds}T(s) + \frac{1}{2}\sigma^2g^2(s)\frac{d^2}{ds^2}T(s) = -1 \quad (7)$$

식 (7)은 다음과 같은 형식을 취함으로써 쉽게 적용할 수가 있다.

$$\frac{d^2T}{ds^2} + A(s)\frac{dT}{ds} = B(s) \quad (8a)$$

여기서

$$A(s) = \frac{2G(s)}{\sigma^2g^2(s)} = \frac{2}{\sigma^2as^{2c}(1-\epsilon s^r)} + \frac{2}{\sigma^2\Omega as^c(1-\epsilon s^r)} - \frac{2b}{\sigma^2a^2s^{2c}(1-\epsilon s^r)^2} \quad (8b)$$

$$B(s) = -\frac{2}{\sigma^2g^2(s)} = -\frac{2}{\sigma^2a^2s^{2c}(1-\epsilon s^r)^2} \quad (8c)$$

위에서 구한 결과는 건조상태로부터 습한 상태로 변이 하는데 필요한 평균 변이기간의 절반을 나타내는데 그 이유는 일단 시스템이 잠재 장벽에 이르게 되면 건조 상태로 되돌아가거나 아니면 습한 상태로 갈 확률이 같기 때문이다. 평균 변이기간 T_1 에 따른 표준편차 δT_2 및 왜곡도 계수 δT_3 는 다음과 같다.

$$\delta T_2 = (T_2 - T_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9a)$$

$$\delta T_3 = (T_3 - 3T_2T_1 + 2T_1^3) \quad (9b)$$

여기서 T_2 와 T_3 는 지배 방정식 (5)를 만족하는 2차 및 3차 모멘트이다.

3. 한강유역 자료 분석

본 연구에서 적용한 한강유역은 그림 1과 같이 북한강과 남한강이 합류된 후 팔당댐 지점까지로 유역면적은 23,541.3km²이다. 그림 1과 표 1에는 본 연구에 사용된 강우자료의 37개 강우관측지점과 10개의 증발량 관측소가 나타나 있다. 강우량자료는 67년부터 92년까지 각 관측소의 일강우자료를 사용하였으며 증발량자료는 같은 기간의 월증발자료를 사용하였다.

보통 강우량은 관측지역내의 여러 개의 관측점으로부터 측정되며 물수지 연구에 있어서 하천 유역에 대한 년 혹은 계절별 평균 강우량 산정이 필수적이라 할 수가 있다. 관측치로부터 평균 면적강우량을 얻기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 티센다각형(Thiessen Polygons), 산술평균(Arithmetic Averages), 등우선법(Isohyetal Methods) 그리고 보간방법(Interpolation Techniques) 등이 있으나 본 연구에서는 관측치로부터 평균 면적강우량 및 증발산량의 산정에 있어 산술평균법을 사용하였다. 표 2에는 산술 평균한 한강유역의 월평균 강우량 및 증발산량이 나타나

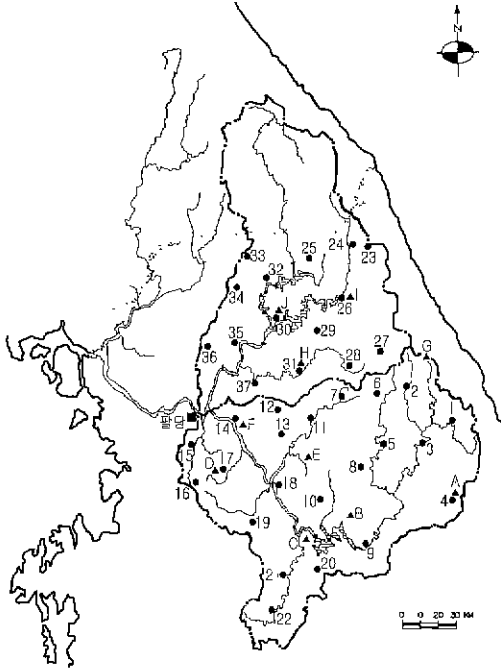


그림 1. 한강유역의 강우 및 증발량 관측소 지점

있다. 유출량자료는 고안지점에서 관측된 68년부터 92년까지의 자료를 이용하였으며 그림 2에 이 기간동안의 월평균 유출량이 나타나 있다. 25년간의 월평균 유출량의 평균치는 $636\text{m}^3/\text{s}$ 이며 이 평균치를 이용하여 정규화한 유출량이 그림 3에 나타나 있다.

표 1. 강우 및 증발량 관측소 지점명

월	강우량 (mm/월)	증발산량 (mm/월)	유출량 (mm/월)
1	26.2	34.5	26.8
2	23.2	41.2	26.9
3	37.3	74.2	39.2
4	60.5	121.3	57.1
5	81.5	150.8	58.8
6	125.4	141.7	58.1
7	298.4	119.9	161.4
8	278.9	121.8	181.8
9	153.6	94.0	132.8
10	42.5	76.7	45.0
11	35.3	45.9	36.4
12	19.3	35.2	32.0

표 2. 월평균 강우량, 증발산량 및 유출량

비고	번호	이름	번호	이름	번호	이름	번호	이름	번호	이름
강우	1	임계	2	진부	3	정선	4	상동	5	평창
	6	봉평	7	장일	8	수주	9	난양	10	백운
	11	황성	12	칭운	13	임동	14	양평	15	광주
	16	운학	17	이천	18	부본	19	생곡	20	삼포
	21	괴산	22	장천	23	송내리	24	서화	25	망산
	26	인제	27	강촌	28	서석	29	두촌	30	춘천
	31	홍천	32	화천	33	상서	34	시내	35	가평
	36	하민	37	서면						
증발량	A	태백	B	제천	C	충주	D	이천	E	원주
	F	양평	G	대원령	H	홍천	I	인제	I	춘천

4. 건조 와 습한 상태 사이의 평균 변이기간의 계산

4.1 모델의 검증

물 수지 방정식의 변수들은 강우 및 유출 관측자료를 기본으로 추정될 수 있다. 식 (1)의 계수 a는 식 (2)와 Budyko(1974)에 의해 제안된 다음의 식을 사용하여 구할 수가 있다

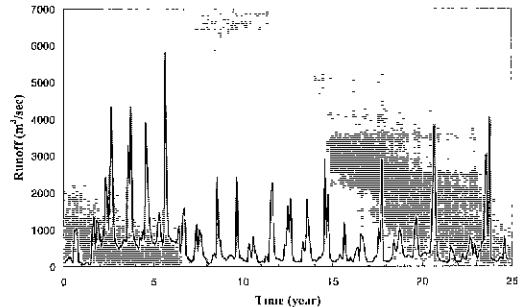


그림 2. 고안지점의 월평균 유출량(68년-92년)

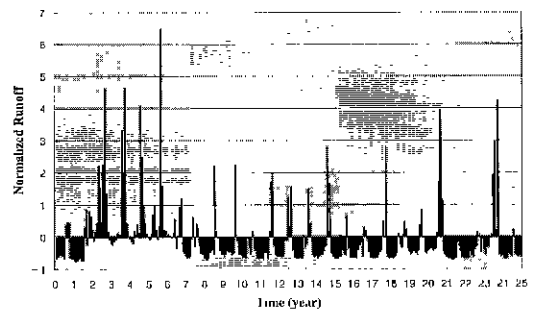


그림 3. 평균치로 정규화된 고안지점의 월평균 유출량

$$P_a = P \frac{1}{1 + \frac{EL}{2wu}} = P \frac{1}{1 + \frac{\Omega}{2}} \quad (10)$$

여기서 P는 유역의 내부에서 증발된 수분으로 인한 강우량과 외부로부터 이동된 강우량 요소를 포함하는 평균 면적강우량, E는 증발산율, L은 유역의 선형 척척, w는 고려되는 유역상에서의 대기의 강우 가능한 수분량, u는 유역을 통하여 수분을 운반하는 공기의 속도를 말한다. 유역내의 관측치로부터 구한 평균 면적 강우량은 3.238mm/day, 평균 증발산량은 2.896mm/day이다. 그러나 w 및 u를 산정하기가 현재로서는 곤란하므로 Ω 를 가정하여 P_a 를 구한 후 변수들을 산정하기 위한 초기치로 사용하였다. 유역 내 강우 중 10%정도가 유역 내에서 증발된 수분으로부터 발생하고 함수비는 0.5로 가정하면 Ω 는 4.5로 가정할 수가 있다. 따라서 위의 값으로부터 구한 계수 a의 값은 0.00336/day이고 토양의 유효깊이 nZr은 80cm로 가정하였다. 실제적으로 계수 a는 시간적으로 변하며 계절에 따라 주기적이 변동을 하게 되므로 수분이동의 주기적인 변동을 고려하기 위하여 계절별 수분 유입주기의 진폭 0.0025/day를 고려하여 a의 값을 변화시켰다. 식 (2)를 사용하여 구한 계수 b의 값은 0.00362/day이다.

모델 변수들은 광역 최적변수 산정 방법(global optimum parameter estimation)인 Random Search Method(Brazil, 1987)를 사용하여 산정하였으며 이때 산정된 변수 값들은 $c=1.099$, $r=0.564$, $\epsilon=1.0$ 그리고, $\Omega=4.047$ 이다. 양의 수치상수 $c=1.099$ 는 선형모델의 경우와 대략적으로 상응하며 식 (1)의 s^2/Ω 항은 0.091인데 이 값은 강우의 재순환 부분이 전체 강우의 약 9%임을 의미하고 있다

4.2 안정상태 사이의 평균 변이기간 계산

앞 절에서 물 수지 방정식의 변수들인 짧은 시간단위 (일)에 대하여 추정되었다. 그러나 보통 변이기간은 년 기간 단위로 분석되어지므로 계수 a와 b의 값은 일 단위로부터 년 단위로 조정된 1.2264/year와 1.3213/year를 사용하였다. 물 수지 방정식에서 가장 중요한 변동이 강우와 관련된 것인데 만일 주위 환경의 변동 강도가 작다면 시스템은 확정론적인 경우와 비슷한 특성을 보이지만 강한 강도의 변동에 대해서는 다른 안정상태로 변이가 일어날 것이고 시스템은 또 다른 강

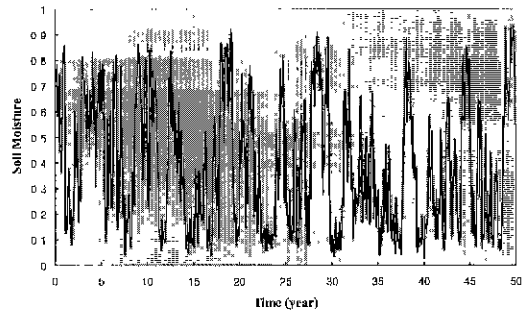


그림 4. 모의 발생된 토양함수비의 시간적 변화 ($\sigma_a=4.34$)

한 변동이 변이를 야기하기 전까지는 새로운 안정상태에 계속 머물 것이다 변동 강도의 대략적인 산정은 전체강우의 분산으로부터 다음 식을 사용하여 구할 수가 있다.

$$\sigma_{PT} = P_a s^c \sigma_a \quad (11)$$

여기서 $P_a=0.9478m/year$, $s=0.4025$ 그리고 모형의 정점시 발생시킨 전체강우로부터의 표준편차는 $\sigma_{PT}=1.514$ 이다. 따라서 식 (11)로부터 변동강도 $\sigma_a=4.34$ 를 얻을 수가 있다. 추계학적 미분방정식 (4a)로 표현된 토양수분의 확률거동, 즉 고려되는 모형의 정상상태 확률분포함수와 극치는 이에 상응하는 Fokker-Planck방정식으로부터 구할 수 있다. 변동강도 $\sigma_a=4.34$ 에 대해 함수비의 정상상태 확률 분포함수의 극대치 $s_a=0.1085$ 와 $s_c=0.664$ 그리고 극소치 $s_b=0.659$ 를 구하였다. 따라서 위의 강도를 가진 주위 환경변동은 두 개의 발생빈도가 높은 함수비 $s_a=0.1085$ 와 $s_c=0.659$ 를 초래하고 있음을 알 수가 있다. 그림 4에 앞에서 산정된 변수들의 값을 사용하여 식 (3)으로부터 구한 함수비의 일부 시계열이 있고 함수비의 확률밀도 함수와 포텐셜함수가 그림 5와 6에 나타나 있다. 확률밀도함수와 포텐셜함수로부터 함수비 값이 높은 값보다 낮은 값에 자주 나타남을 알 수가 있는데 이것은 습한 상태에서부터 잠재 장벽 $s_b=0.659$ 를 극복하여 건조 상태로 변이 하는 것이 비교적 쉽기 때문이다. 낮은 함수비(건조상태)로부터 높은 함수비(습한 상태)로의 평균 변이기간이 그림 7에 나타나 있는데 함수비 $s=0.1085$ 에서 잠재장벽을 지나 습한 상태로의 평균 변이기간이 약 2.7년임을 알 수가 있고 이것은 잠재 장

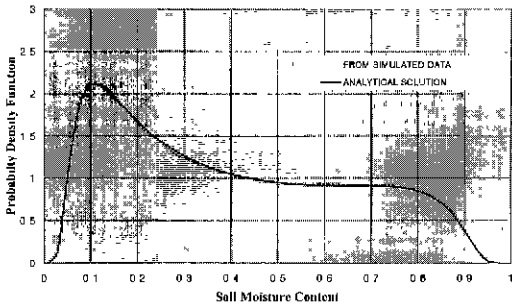


그림 5. 모의된 함수비와 해석적 방법으로부터 구한 확률밀도함수

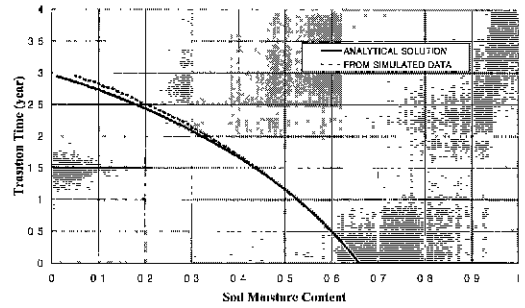


그림 7. 해석적 및 모의된 함수비로부터 구한 변이시간

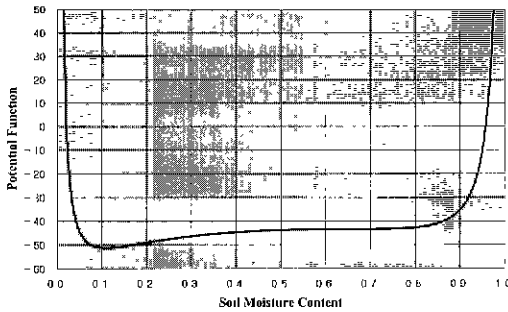


그림 6. 해석적으로 구한 포텐셜함수

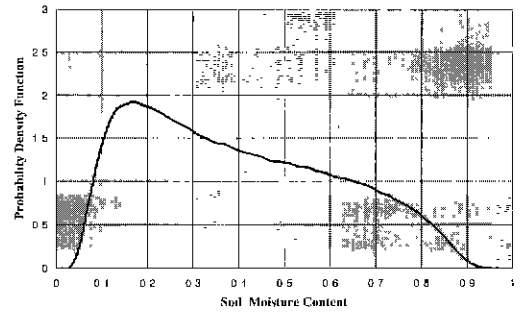


그림 8. 변동계수가 3.5일때의 확률밀도함수

벽까지 도달하는데 1.35년이 걸리며 잠재장벽에서 건조나 습한 상태로 이동할 확률이 같으므로 습한 상태로 변이 하는데 2.7년이 소요됨을 의미한다. 결과를 검토하기 위해 식 (3)으로부터 5,000년 동안 발생시킨 함수비의 시계열로부터 Crossing Theory(Brass, 1985, Nordin, 1970)개념을 이용하여 평균 변이기간을 계산하였다. 그림 7에 발생된 자료로부터의 평균 변이기간이 나타나 있는데 결과가 잘 일치함을 알 수가 있다. 식 (9)로부터 평균 변이기간의 표준편차와 왜곡도 계수를 구한 결과 표준편차가 평균과 같은 치수를 가지고 있어 시스템이 상당히 변화성이 많음을 알 수가 있고 왜곡도가 양의 값으로 나와 변이기간의 확률분포가 비대칭적이고 평균에 비해 작은 변이기간 쪽으로 편중되어 있음을 의미한다. 한강 유역에 대한 변동강도가 식 (11)로부터 구해졌으며($\sigma_a=4.34$) 변동강도의 산정에서 많은 불확실성이 개입된다.

서로 다른 값의 변동강도는 확률분포의 모양과 안정상태의 수 뿐만 아니라 위치를 변화시킨다. 따라서 한강 유역에 있어서 강도의 변화에 따른 영향을 알아보

는 것도 중요하다고 할 수 있겠다. 변동강도 $\sigma_a=3.5$ 및 $\sigma_a=5.0$ 에 대하여 평균 변이기간을 분석하여 보았다. 변동강도 $\sigma_a=3.5$ 에 대해서 시스템은 여러 개가 아닌 오직 한 개의 안정상태를 보여 주었는데 이 변동강도는 두 개의 안정상태를 발생시켜 변이가 생길 정도로 크지 않음을 의미한다. 그림 8에 $\sigma_a=3.5$ 인 경우의 함수비의 확률밀도함수가 나타나 있다. 변동강도 $\sigma_a=5.0$ 에 대해서 시스템은 두 개의 안정상태 즉 두 개의 최대치 $s_a=0.0815$ 와 $s_c=0.815$ 그리고 최소치 $s_b=0.549$ 를 가지고 함수비 $s=0.1$ 로부터의 평균 변이시간 약 1.72년이 소요됨을 알 수 있다. 따라서 높은 변동강도가 더 큰 변동을 초래하고 잠재장벽이 자주 극복되기 때문에 평균 변이기간이 감소하게 됨을 알 수 있다. 그림 9에 $\sigma_a=5.0$ 인 경우의 확률밀도함수가 나타나 있다.

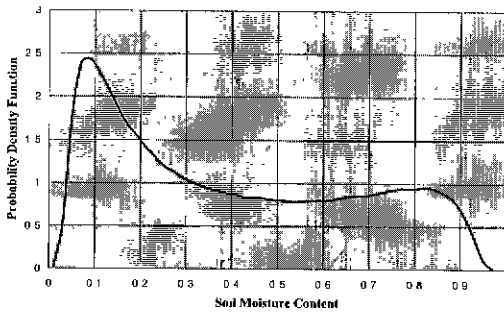


그림 9. 변동계수가 5.0일때의 확률밀도함수

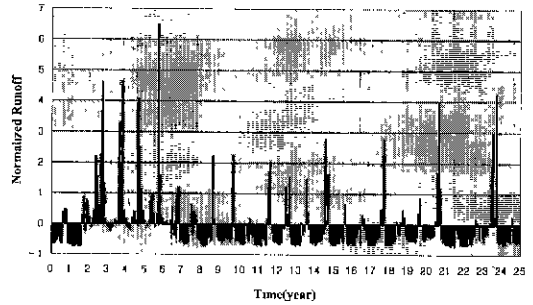


그림 10. 잠재장벽에 해당하는 유출량으로 정규화한 월평균유출

4.3 과거 실측 자료로부터 평균 변이기간의 계산

앞 절에서 보여준 한강 유역의 함수비 동력학은 Rodriguez-Iturbe 등(1991a)에 의한 추계학적 모형을 기본으로 하였고 건조상태와 습한 상태 사이의 평균 변이기간이 산정된 변수와 함께 이론식으로부터 구해졌다. 결과를 비교하기 위해 고안지점에서 관측된 자료와 Crossing Theory 개념을 사용하여 독립적으로 평균 변이기간을 구하였다. 자료로부터 평균 변이기간을 구하기 위해서는 함수비에 관한 자료가 없기 때문에 이론적인 분석에서 구한 잠재장벽($s_b=0.659$)에 상응하는 기준 유출 값을 알아야 한다. 앞에서 사용한 변수들의 값을 사용하여 식 (1)로부터 역으로 잠재장벽의 함수비 값에 해당하는 기준 유출값을 구할 수가 있는데 그 값이 $655\text{m}^3/\text{sec}$ 이다. 고안지점에서의 1968년부터 1992년까지의 평균 월 유출량으로부터 기준 유출 $655\text{m}^3/\text{sec}$ 보다 적은 유출값을 선택하여 잠재 장벽에 상응하는 기준 유출값을 통과 할 때까지의 시간을 계산하고 전 시계열에 대한 변이시간을 평균함으로써 특정한 유출값으로부터 기준 유출까지의 평균 변이기간을 구할 수 있다.

그림 10은 잠재장벽에 해당하는 기준 유출량인 $655\text{m}^3/\text{sec}$ 로 정규화한 고안지점의 월평균유출량이 나타나 있다. Crossing Theory 개념을 사용하여 과거 자료로부터 구한 평균 변이기간이 그림 11에 나타나 있는데 앞에서 이론과 모의된 함수비로부터 구한 변이기간보다는 작게 나오고 있다. 이는 유출관측지점인 고안지점이 필당담아래에 위치하고 있어 유출량이 자연 상태보다 댐에 의해 조절되어지기 때문에 갈수유량 및 홍수유량이 상당히 완화되어 있어 정확한 자연상태의

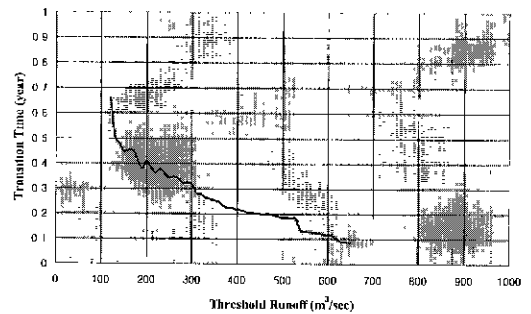


그림 11. 고안지점에서의 잠재장벽에 해당하는 유출량에 대한 변이기간

유출변화를 대변하지 못하고 댐에 의해 변동되기 때문인 것으로 생각된다.

5. 결 론

한강 유역의 지표면 수문은 두 개의 선호하는 안정 상태 즉 건조와 습한상태를 가지고 있음을 보였고 이러한 현상은 지표면과 대기간의 상호 관계에 기인한다고 생각할 수 있다. 본 연구에서는 한강 유역과 관련하여 가뭄이나 홍수기의 지속기간의 평균과 고차 모멘트로부터 도출된 상대적인 안정성을 통한 양쪽 영역의 통계학적 예측을 하기 위한 시도를 하였다. 본 연구를 통해 시스템이 함수비가 두 개의 안정상태를 가지고 있고 주위환경의 무작위 변동의 결과로 안정상태 사이를 빈갈아 이동함을 보았다. 작은 주위환경 변동에 대해서는 시스템은 비교적 긴 거주시간을 가지나 큰 변동에 대해서는 안정상태 사이에 빈번한 변이가 일어났다. 모형을 적용하기 위해 한강유역과 관련된 실측자료와 점정을 통하여 $a=0.00336/\text{day}$, $b=0.00363/\text{day}$,

$c=1.099$, $r=0.564$, $\varepsilon=1.0$ 그리고 $\Omega=4.047$ 을 구하였다. 한강 유역에 대해 산정된 변수들을 사용하여 서로 다른 주위환경 변동강도에 대한 평균 변이기간을 구한 결과 변동강도 $\sigma_a=4.34$ 에 대해 건조한 안정상태 ($s_a=0.1085$)로부터 잠재장벽을 지나 습한 안정상태 ($s_c=0.664$)로의 평균 변이기간이 약 2.7년이 걸렸다. 변동강도가 클수록 잠재 장벽을 통한 안정상태 사이의 평균 변이기간이 짧아진다. 계산된 강우의 재순환 요소가 전체 강우의 약 9%가 되는데 비록 전체 강우에 비해 적은 양이지만 수문현상의 분석에 있어 이 재순환 효과는 무시되어 질 수 없다. 본 연구의 방법은 한강 유역에 대한 합수비나 강우 특히 매우 다양한 지속기간을 보이는 합수비 및 강우나 유출의 급격한 변화와 관련된 중요한 특성을 보여주고 있다. 또한 잠재장벽에 상응하는 유출값의 규정은 가뭄의 예측에 실제적인 유용성을 줄 수 있다고 본다.

참 고 문 헌

- Brass, R. L. and Rodriguez-Iturbe, I. (1985). "Random Function and Hydrology", Addison-Wesley Publishing Company, pp. 559.
- Brazil, L. E. and Krajewski, W. F. (1987). "Optimization of Complex Model Using Random Search Methods", *Engineering Hydrology Proceeding*, Aug. 3-7, pp. 726~731.
- Budyko, M. I. (1974). "Climate and Life", Academic Press, New York, pp. 508.
- Demaree, G. E. and Nicolis, C. (1990) "Onset of Sahelian Drought Viewed as a Fluctuation Induced Transition", *Quart. J. Roy. Meteo. Soc.*, No. 116, pp. 221~238.
- Gardiner, C. W. (1983). "Handbook of Stochastic Methods for Physics Chemistry and the Natural Sciences", Springer Verlag, Berlin, pp. 443.
- Nordin, C. F. and Rosbjerg, D. M. (1970). "Application of Crossing Theory in Hydrology", *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, XV. 1, pp. 27~43.
- Rodriguez-Iturbe, I., Entejhabi, I. D. and Brass, R. L. (1991a). "Nonlinear Dynamics of Soil Moisture at Climate Scales: 1. Stochastic Analysis", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1899~1906.
- Rodriguez-Iturbe, I., Entejhabi, I. D., Lee, J-S and Brass, R. L. (1991b). "Nonlinear Dynamics of Soil Moisture at Climate Scales: 1. Chaotic Analysis", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1907~1915

(논문번호:99-041/접수 1999 07 13/심사완료:2000.01.25)