추계학적 기상모의모형에 대한 검토

유 철 상 |
고려대학교 사회환경시스템공학과 교수
envchul@korea.ac.kr

1. 서 론

관측된 기상계열에 대한 모형들은 수공학분야, 농업분야, 생태계분야 등의 연구에 다양하게 이용된다. 특히 관측된 자료가 제한된 기간 및 제한된 지점에만 존재한다는 한계가 이러한 기상모의모형의 수요를 더욱 크게 만든다. 이러한 모형들은 소위 '날씨모의장치(weather generator)' 라고 불리어지기도 한다.

기상모의모형은 기상예측모형과 다르다. 기상모의모형은 관측된 기상특성을 재현해 내는데 목적이 있다. 반면에 기상예측모형은 현재 또는 과거의 관측자료를 경계조건으로 하여 미래의 기상상태를 예측하는 목적을 가진다. 일반적으로 전자의 경우는 주로 관측된 기상자료의 통계적 특성을 만족시키는 조건하에서 기상자료를 모의하게 되며(따라서 어떤 확률분포를 따르는 난수(random number)의 모의와 유사하다), 후자의 경우는 일반적으로 기상과정을 지배하는 편미분방정식을 수치해석하여 해를 얻는 과정이 포함된다.

모의된 기상자료는 관측자료가 갖지 못하는 여러 특성을 추출하는데 용이하다. 무엇보다도 장기간에 걸쳐 다지점(multi-site) 또는 다차원(multi-dimensional) 강우장의 생성이 가능해 다양한 관련 연구에 입력자료로 사용될 수 있다. 기상모의에 필요한 조건을 적절히 바꾸어 줌으로서 과거 또는 미래의 상황에 맞는 기상자료의 모의도 가능하다. 장기모의를 통해 극치사상의 추출 및 특성의 파악도 가능하다. 그러나 현재까지는 시간단위의 자료 보다는 일단위의 자료가, 다지점 또는 다차원의 자료보다는 단일지점의 기상자료모의가 더 보편적인 것이 사실이다. 이는 보다 그럴듯한 다지점 또는 다차원의 강우모의가 아직 기대수준을 만족하는 상태가 아니며 보다 더 많은 연구가 필요한 부분임을 암시하는 것이기도 하다.

본 논고에서는 이러한 추계학적 기상모의모형의 발전과정, 이론적 배경 및 특성, 기타 해결되어야 문제들을 위주로 정리해 보고자 한다.

2. 추계학적 기상모의모형의 발전과정

추계학적 기상모의모형에서 가장 중요한 부분이 강우의 모의 부분이다. 물론 강우가 여러 기상인자들 중에서 가장 중요한 역할을 하며, 그 적용분야도 넓다. 그러나 강우가 더욱 중요한 이유는 강우를 제외한 나머지 기상인자들이 강우의 유무에 크게 영향 받기 때문이다. 아울러 강우는 다른 기상인자와는 다른 특징들을 가지고 있어 그 정량화나 통계적 특성화가 매우 까다로운 편이다. 기본적은 강우가 연속된(continuous) 부분과 불연속된(discontinuous or discrete) 부분이 합쳐져 있는 혼합특성(mixed characteristics)을 가지고 있다는 점이 특이하다(참고, 그림 1). 즉, 대부분의 강우자료는 '0' 으로 구성되어 있으며, 강우(rain or wet) 부분과 무강우(no rain or dry) 부분은 불연속적으로 연결된다. 강우부분만은 또한 연속된 부분으로 판단할 수 있다. 이에 반해 다른 기상인자의 경우는 대체로 연속된 부분으

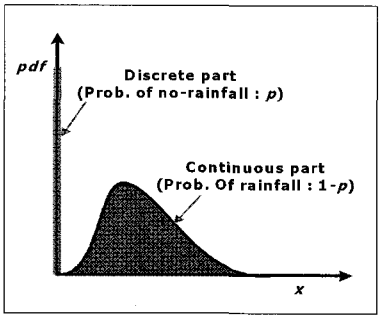
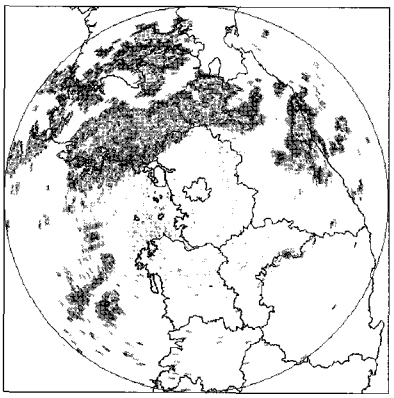
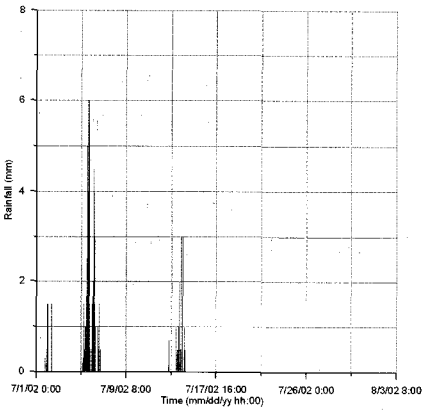


그림 1. 강우자료의 확률밀도함수: 강우자료의 대부분은 무강우 부분으로 구성된다. 따라서 강우의 정량화에는 이러한 무강우 부분의 고려가 매우 중요하다.



(a) 공간적인 군집성 및 간헐성
(2003/08/02 관악산 레이더 영상)



(b) 시간적인 군집성 및 간헐성
(2002년 7월~8월 서울관측소 시강우자료)

그림 2. 강우장의 군집특성 및 간헐성: 강우장은 시-공간적으로 군집특성과 간헐성을 강하게 나타낸다. 이러한 특성의 고려없는 강우장의 특성화는 큰 오차를 포함할 수 밖에 없다.

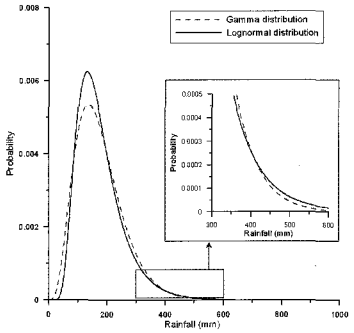


그림 3. 확률밀도함수의 꼬리부분 비교: 주요 수공설계에 고려되는 것이 주로 확률밀도함수의 꼬리부분이다. 확률밀도함수에 따른 이 부분의 차이가 설계강우량의 커다란 차이로 연결된다.

로만 구성된다.

따라서 대부분의 추계학적 기상모의모형은 강우의 발생부분과 강우강도의 결정부분이 분리되어 있다. 일반적으로 강우의 발생은 강우 및 무강우로 표현하여 모의한다. 이러한 모의과정에서 중요하게 고려되는 것이 강우 또는 무강우의 지속성이다. 이러한 지속성의 결과로 강우는 강우끼리 무강우는 무강우끼리 모이는 특성을 보여주게 된다(참고, 그림 2). 이러한 강우의 특성들을 집약적으로 표현한 용어로 강우의 간헐성(intermittency)과 군집성(clustering)이 있다.

강우강도는 일반적으로 크게 오른쪽으로 왜곡된 확률밀도함수를 나타낸다. 즉, 대부분의 강우는 '0' 주위의 매우 작은 값을 가지며 큰 강우강도는 적은 빈도를 가지고 넓게 분포하게 된다. 강우와 관련된 분석에서는 특히 큰 강우강도가 중요하므로 오른쪽 꼬리부분의 모형화나 해석이 보다 중요한 의미를 갖게 된다(참고, 그림 3).

2.1 강우발생과정

강우의 발생과정과 관련한 최초의 연구는 1852년의 Quetelet의 연구를 들 수 있다(Katz(1985)에서 재인용). 그는 수십년간의 강우 기록을 근거로 강우의 지속특성을 분석한 것으로 알려져 있다. 또 다른 연구로 Newnham(1916)을 들 수 있는데 그도 또한 강우 및 무강우의 지속특성과 관련하여 전일(previous lay)이

강우인 경우가 무강우인 경우보다 오늘(present day) 강우발생 확률이 높다는 것을 보여주고 있다. 유사한 연구로서 Besson(1924), Gold(1929), Cochran (1938), Williams(1952) 등이 있으며, 대부분 무강우 및 강우기간의 연속성을 확률로 정리하는 것에 초점 맞추어져 있다. 특히, 전대수지(log-log paper)에 무강우 또는 강우기간과 이의 발생확률을 표시하면 대체로 선형의 관계가 파악된다.

Gabriel과 Neumann(1962)의 연구는 이러한 관계를 처음 통계적으로 정리하여 모형화 한 경우에 해당한다. 그들은 간단한 현재의 강우 또는 무강우 상태가 전날은 강우 또는 무강우 상태에만 영향 받는다고 가정하고 간단한 1차 마코프 모형(1st-order Markov model)을 적용하여 강우발생을 정량화 하였다. 이 모형은 다음과 같은 조건부확률 또는 전이확률을 가지고 쉽게 설명된다.

$$p_{01} = \Pr\{wet_t \mid dry_{t-1}\} \tag{1}$$

$$p_{11} = \Pr\{wet_t \mid wet_{t-1}\} \tag{2}$$

위 식에서 wet_t는 t-시점에 강우가 발생했다는 것을 의미하고, dry_t는 t-시점에 무강우 상태라는 것을 의미한다. 따라서, p_{01}은 전일에는 무강우 현재에 강우가 발생하는 경우의 확률을 나타내고, p_{11}은 전일 및 현재 모두 강우가 발생하는 경우의 확률을 나타낸다. 따라서 또 다른 두 경우인 p_{00}및 p_{10}와는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$p_{01} + p_{00} = 1.0 \tag{3}$$

$$p_{11} + p_{10} = 1.0 \tag{4}$$

이와 같은 마코프 모형의 특성은 다음과 같은 강우의 다른 특성을 유도하는데도 유용하다. 먼저, 강우의 발생확률은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$p_1 = p_{01}/(1 + p_{01} - p_{11}) \tag{5}$$

아울러 강우발생의 1차 자기상관계수도 다음과 같이 유도된다.

$$r_1 = p_{11} - p_{01} \tag{6}$$

이외에도 1차 마코프 모형을 가정하는 경우에는 다음과 같은 통계특성의 유도가 가능하다. 먼저, 임의 지속기간의 강우 또는 무강우의 발생확률은 다음과 같이 표현된다.

$$\Pr\{X = x\} = p(1-p)^{x-1} \tag{7}$$

위 식에서 임의 길이 무강우 기간의 발생확률을 계산하는 경우에는 $p=p_{01}$, 임의 길이 강우기간의 발생확률을 계산하는 경우에는 $p=1-p_{11}$이 된다. 식 (5)에 의하면 임의 기간 T 동안에 발생 가능한 강우일수의 평균 및 분산은 다음과 같이 계산된다.

$$E[N(T)] = p_1 T \tag{8}$$

$$Var[N(T)] = p_1(1-p_1)T\frac{(1+r_1)}{(1-r_1)} \tag{9}$$

위 모형의 적용을 위해서는 일반적으로 균일분포를 따르는 무작위수(random number)를 모의할 필요가 있다. 이 무작위수는 일반적으로 내장함수(internal function)의 형태로 제공되므로 쉽게 이용할 수 있다. 일단 무작위수가 모의되면 전날의 강우/무강우 상태와 전이확률을 고려하여 현재의 강우/무강우 상태를 결정하게 된다. 예를 들어 전일이 강우이고 모의된 무작위수가 p_{11}이하면 현재를 강우상태로 지정하게 된다.

그러나 1차 마코프 모형을 이용하여 자료를 모의하는 경우 상대적으로 긴 무강우 기간의 발생 빈도가 관측치의 경우보다 작게 나타나는 문제점이 나타나기도 한다(Buihand, 1977; Racsko 등, 1991;

Guttop, 1995). 이런 문제점을 극복하기 위해 Jones와 Thornton(1997), Wilks(1999a) 등은 고차의 마코프 모형을 사용할 것을 제안하였다. 예를 들오 2차 마코프 모형은 전일 및 전전일의 상태가 현재의 상태를 결정하는데 영향을 미치게 된다. 따라서, 고차의 마코프 모형은 1차 마코프 모형보다 긴 기억길이(memory length)를 갖게 되고 따라서 특히 긴 강우 또는 긴 무강우 사상을 표현하는데 유리하게 된다.

마코프 모형 대신 강우의 발생을 모의할 수 있는 방법으로 무강우 또는 강우기간 모형이라는 것이 있다. 마코프 모형이 일단위로 강우의 발생을 판단한다면 이 모형은 강우 또는 무강우 기간이 끝나는 시점에서 무강우 또는 강우의 기간을 주어진 무강우 기간 또는 강우 기간의 확률분포로부터 결정하는 방법이다. 즉, 강우가 끝나는 시점에서는 무강우 기간의 확률분포로부터 무강우 기간을 무작위로(randomly) 추출하게 되고, 반대로 무강우 기간이 끝나는 시점에서는 강우기간의 확률분포로부터 강우 기간을 무작위로 추출하게 된다. 이 모형에서는 강우부분과 무강우 분분이 교대로 선택되기 때문에 'alternating nenewal model'이라고 부르기도 한다(Buishand, 1977; 1978; Roldan과 Woolheiser, 1982). 그러나 이 모형을 이용하는 경우 관측자료가 충분이 확보되어야 하는데, 특히 25년 미만의 자료정도만이 가용한 경우 적절한 매개변수 추정에 문제가 있을 수 있다는 보고가 있다(Roldan과 Woolheiser, 1982).

2.2 강우량과정

기상모의모형에서 다음으로 필요한 요소는 강우발생시의 강우량을 모의하는 과정이다. 일반적으로 관측된 일 강우의 확률밀도함수는 오른쪽으로 심하게 왜곡된 형태를 보인다. 즉, 작은 강우량의 발생이 매우 일반적인 반면 기상분야, 수공학분야, 농업분야 등에서 매우 중요한 큰 강우량의 발생은 매우 드물다. 이와 관련한 연구는 Todorovic과 Woolhiser (1975)에서 처음 찾아볼 수 있다. 그들은 강우의 발생은 1차 마코프 모형을 따른다고 가정하였고 강우발생시의 강우량은 지수분포를 따른다고 가정하였다. 지수분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x)=\frac{1}{\mu}\exp[\frac{-x}{\mu}] \tag{10}$$

사실 지수분포는 강우량을 모형화하는데 사용할 수 있는 가장 간단한 모형이다. 그러나 모형의 매개변수가 하나임에도 불구하고 특히 오른쪽으로 왜곡된 일 강우의 특성을 잘 나타내는 것으로 알려져 있다. 지수분포를 따르는 경우 강우량의 평균은 μ, 분산은 μ^2으로 매개변수의 추정이 매우 간단하다. 따라서 Richardson(1981), Wilby(1994) 등 많은 연구에서 이 모형을 채택하여 사용하고 있다.

지수분포보다 복잡한 모형을 사용하여 일 강우량을 정량화 경우도 많다. 이 중 이변수 감마분포의 선택이 상대적으로 많아 보인다(Katz, 1977; Stern 과 Coe, 1984; Wilks, 1989. 이변수 감마분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x)=\frac{(x/\beta)^{\alpha-1}\exp[-x/\beta]}{\beta\Gamma(\alpha)} \tag{11}$$

위 확률밀도함수는 두 개의 매개변수를 포함한다. 하나는 형태변수(shape parameter) α이고 또 하나는 위치변수(scale parameter)인 β이다. $\Gamma(\alpha)$는 α대해 계산되는 감마함수에 해당한다. 이 함수는 평균이 $\alpha\beta$이고 분산이 $\alpha\beta^2$이다. $\alpha<1$인 경우 이 확률밀도함수는 지수분포와 그 형태는 유사하나 꼬리 부분에 대한 비중이 작아 큰 강우량의 발생확률은 매우 작아지게 된다. $\alpha=1$인 경우는 지수분포와 동일한 분포가 되며, 일반적으로는 $\alpha>1$이 되어 매우 다양한 형태의 확률분포에 적용성이 좋다. 추가의 변수가 도입된 3변수 감마분포는 2변수 감마분포에 비해 보다 유연한 적용성을 갖는다.

지수분포의 대안으로 사용되는 분포 중에 혼합지수분포(mixed exponential distribution)가 있다

(Woolhiser와 Pegram, 1979). 여기서 혼합지수분포는 두 개의 지수분포를 선형결 합한 형태를 의미한다. 따라서 혼합지수분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(x)=\frac{\alpha}{\mu_1}\exp[\frac{-x}{\mu_1}]+\frac{1-\alpha}{\mu_2}\exp[\frac{-x}{\mu_2}] \qquad (12)$$

위 식은 수학적으로 두 개의 지수분포를 라는 혼합매개변수를 이용하여 중첩해 놓은 형태가 된다. 따라서 그 평균은 $\alpha\mu_1+(1-\alpha)\mu_2$가 되고, 분산은 $\alpha\mu)1^2+(1-\alpha)\mu_2^2+\alpha(1-\alpha)(\mu_1-\mu_2)^2$ 로 나타난다. 이 모형은 상대적으로 많이 이용되고 있는 편은 아니나 감마분포에 비해 일 강우를 보다 잘 나타내는 것으로 평가되고 있다(Foufoula-Georgiou 와 Lettenmaier, 1987; Wilks, 1998; 1999a). 특히, Wilks(1999a)는 극치 강우량의 표현에 이 분포가 매우 좋은 결과를 나타냄을 보인 바 있다.

대부분의 추계학적 기상모의모형에서는 강수발생시의 강우강도가 서로 독립적이며 동일한 확률분포를 따르는 것으로 가정하고 있다.

그러나 강우발생시라도 강우-강우로 이루어지는 경우의 일 강우량 분포와 무강우-강우로 이루어지는 강우량 분포가 다를 수 있다는 보고도 있으며 이를 고려한 모형이 제시되기도 하였다(Katz, 1977; Chin과 Miller, 1980; Wilks, 1999a).

또한 연속된 강우사이의 상관이 매우 유의하여 이를 강우모의에 고려해야 한다는 연구도 있다(Katz, 1977; Foufoula-Georgiou와 Lettenmaier, 1987).

그러나 이러한 고려는 강우를 모의과정의 복잡성에 비해 뚜렷하게 큰 차이를 보여주지는 못하는 것으로 파악되고 있다.

그러나 일 강우와는 달리 시 자료의 경우에 있어서는 강우사이의 상관이 매우 유의하며 또한 이를 고려하는 경우와 고려 안하는 경우의 차이가 큰 것으로 파악되고 있다(Katz와 Parlange, 1995).

3. 다른 기상인자의 경우

현재까지의 대부분의 관련 연구가 강우의 모형화에 집중되어 왔다는 것은 부인하기 어렵다. 그러나 많은 기상모의모형의 실재적인 적용사례에서 강우 외 다른 기상인자의 중요성을 쉽게 확인할 수 있다. 예를 들어 식생모형(crop model)의 민감도 분석결과에 의하면 단순히 평균기온을 적용한 경우의 식생의 생산량은 실제보다 현격히 과대 추정되는 결과를 보인다. 따라서 실제의 기온 변동성을 모의할 수 모의모형이 절대적으로 필요하다(Richardson, 1985; Nonhebel, 1994). 현재까지 알려진 관련모형중 대표적인 것으로 WEGEN(Weather Generator; Richardson, 1981)이 있다. 이 모형에서 강우를 제외한 다른 기상인자의 통계특성은 강우의 발생 유무에 크게 영향을 받는다. 그러나 다른 기상인자, 예를 들어 기온에 영향을 주는 인자가 강우의 발생 유무 이외에도 구름의 양이나 일사량 등 다양하므로 강우의 발생유무 자체만으로는 그 설명력에 한계가 있을 수 밖에 없다(Hutchinson, 1995).

WGEN 모형의 경우, 강우 외 다른 기상인자들의 통계특성은 1차 벡터 자기회귀모형(first-order vector autoregressive model)으로 설명된다. 이 때 1차의 의미는 마코프 연쇄에서의 1차와 같은 의미이다. 즉, 오늘의 상태는 전일의 상태에만 영향을 받는다고 가정한다. 이 가정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$z(t)=[A]z(t-1)+[B]\epsilon(t) \qquad (13)$$

위 식에서 z(t)는 표준정규분포를 따르는 강우 외 기상인자들에 해당하는 K-차원의 벡터이고, z(t-1)은 전일에 해당하는 것이 된다. 아울러 [A]와 [B]는 각각 K x K의 매개변수 행렬이다. 또한 K-차원의 오차항인 $\epsilon(t)$도 표준정규분포를 따르게 된다. 예를 들어 K=3인 경우, 위식은 다음과 같이 풀어서 쓸 수 있다.

$$z_k(t) = a_{k,1} z_1(t-1) + a_{k,2} z_2(t-1) + a_{k,3} z_3(t-1) + b_{k,1}\epsilon_1(t) + b_{k,2}\epsilon_2(t) + b_{k,3}\epsilon_3(t) \quad (14)$$

예를 들어 위 식에서 z_1, z_2, z_3를 각각 일최대온도, 일최저온도 및 일사량이라 가정하면, 현재의 일최대온도, 일최저온도 또는 일사량은 각각 전일의 일최대온도, 일최저온도 및 일사량을 가지고 결정할 수 있다. 대상으로 하는 기상인자 및 다른 기상인자의 영향정도는 각 기상인자 사이의 상관정도에 따라 다르며 또한 오차항인 $\epsilon(t)$의 분산의 규모에도 영향을 받는다. 만일 오차항의 분산이 매우 크다면 다른 기상인자의 영향력은 크게 저하될 수 밖에 없다.

매개변수 행렬 [A]와 [B]는 관측자료를 가지고 결정한다. WEGEN의 경우에서는 이 매개변수 행렬의 계절적, 공간적 변동성이 작다고 가정하여 일정한 값으로 가정하고 있으나, 다른 연구의 경우에서는 그 변동성이 유의할 정도로 크다는 보고도 있다 (Hayhoe, 1998). 따라서 대상으로 하는 지역에 적절한 매개변수 행렬을 결정하여 사용하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

식 (13)을 이용하여 각 기상인자에 대한 표준정규분포를 따르는 변량이 모의되면 이 변량은 당일의 강우 조건에 따라 다르게 변환된다. 즉, 당일의 강우조건에 따라 각각 다른 변환식이 적용된다.

$$T_k(t) = \begin{cases} \mu_{k,0}(t) + \sigma_{k,0}(t) z_k(t), & \text{if day t is dry} \\ \mu_{k,1}(t) + \sigma_{k,1}(t) z_k(t), & \text{if day t is wet} \end{cases} \quad (15)$$

위 식에서 T_k는 각 기상인자를 의미하고, $\mu_{k,0}$및 $\sigma_{k,0}$는 무강우 조건하에서의 평균 및 표준편차를, $\mu_{k,1}$및 $\sigma_{k,1}$는 강우 조건하에서의 평균 및 표준편차를 나타낸다. 이들 평균 및 표준편차의 계절적 변동특성은 일반적으로 월별로 정량화 되거나 또는 Fourier 급수를 이용하여 정량화 된다. 강우 및 무강우 조건에서 모의된 기상인자의 특성이 다르기 때문에 최종적으로 얻어지는 기상인자들은 정규분포를 따르지 않을 가능성이 높다. 그러나 정규분포에서 크게 벗어나는 경우는 그리 많지 않은 것으로 보고되고 있다.

4. 일단위 기상모형의 경년변동특성 고려

일단위로 모의되는 기상모형에 년중 변동특성을 고려할 수 있게 하는 것은 상대적으로 간단한 일이다. 앞에서 언급한 것과 같이 년중 계절적으로 변화하는 평균 및 분산의 변화를 Fourier 급수를 이용하여 정량화 하거나 또는 월별 평균 및 분산을 따로 고려할 수도 있다. 경우에 따라 월별로 변화는 강수일수의 평균 및 분산을 이용하여 회귀식 형태로 정량화

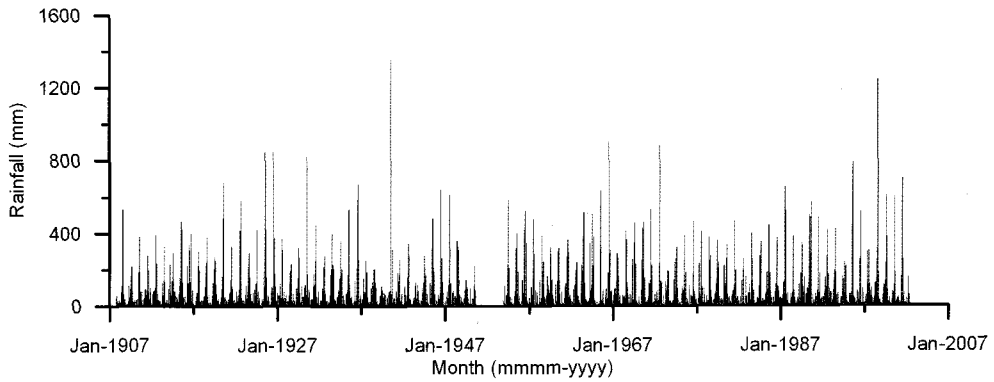


그림 4. 강우자료의 경년변동: 시각적으로 보이는 강우의 장기간 변동특성은 그 비선형적 거동으로 인해 이론적으로 정량화기 어렵다. 그러나 이러한 강우의 경년변동은 홍수, 가뭄 등 극단적인 기상상태의 모의에 반드시 고려되어야 할 특성이기도 하다.

를 시도하기도 한다(Gregory 등, 1993; Kartz와 Palange, 1998). 이러한 시도는 대부분 년중 기상인자의 변동특성을 나타내는 데는 큰 무리가 없다.

그러나 기상인자의 경년변동을 나타내는 것은 간단한 일이 아니다(참고, 그림 4). 일반적으로 대부분의 기상모의모형은 기상인자의 경년변동을 잘 모의하지 못한다. 이러한 가장 큰 이유는 기상인자의 경년변동을 고려하기에는 너무나 간단한 기상모의모형을 사용하고 있다는 점이다. 아울러 단순히 모형의 차수를 늘리거나, 강우 및 무강우를 분리하는 정도로는 기상인자의 경년변동을 충분히 모의할 수 없다는 것이 보고되기도 하였다(Kartz와 Palange, 1998; Wilks, 1999a). 이러한 문제점을 대기순환의 장기경년변동특성이나 ENSO나 SST의 장기변동특성을 고려하여 극복하려는 시도가 이루어지고 있으나(Wallis와 Griffiths, 1997; Wilby, 1998), 아직은 더 많은 연구가 필요한 상태이다.

5. 기상모의모형의 이용

기상모의모형은 주로 기상상태를 모의하여 이를 입력으로 하는 다양한 시스템의 출력을 조사하기 위해 이용되어 왔다. 수문학 또는 수자원공학 분야의 경우에도 모의된 강우 및 기상자료는 홍수유출 및 장기유출특성의 변화를 예측하거나, 또는 가뭄 또는 홍수의 발생패턴 변화를 연구하기 위해 사용되어져 왔다. 농업생산성에 대한 기후변화의 영향을 모의된 기상자료를 이용하여 추정하거나(Mearns 등, 1984), 기후변화에 따른 침식특성의 변화를 추정하기 위해서도 모의된 기상자료를 입력자료로 사용한다(Favis-Mortlock 등, 1997). 식생을 비롯한 생태학적인 변화를 모의하기 위한 모형의 입력자료로도 다양한 기상상태의 자료가 모의되어 이용된다(Friend 등, 1997). 현재에도 이와 같은 다양한 모의모형 또는 평가모형의 입력자료를 제공하기 위한목적으로 기상모의모형을 이용하는 것이 가장 일반적이다(Valdes 등, 1994; Wilby 등, 1994).

결측된 기상자료를 복원하기 위한 수단으로 기상모의모형이 이용되기도 한다(Hanson 등, 1994; Hutchison, 1995). 특히 다양한 기상자료의 관측이 제한적인 지점에서만 이루어 지는 경우 이들 지역에서 동떨어진 제 3의 지점 또는 일부 기상인자만이 관측되는 지점에 필요한 기상인자의 모의를 기상모의모형을 이용하여 제공할 수 있다. 일반적으로 적용되는 방법으로는 기상모의모형의 적용에 필요한 매개변수를 공간적으로 내삽하는 방법이 주로 이용된다(Hansen 등, 1994). 경우에 따라서는 년 또는 월평균의 자료특성을 가지고 일 단위의 기상인자를 모의하는 데에도 기상모의모형이 이용되기도 한다. Hershfield(1970), Geng 등(1986) 등의 경우 이러한 적용이 가능하도록 둘 사이의 유의한 상관이 존재함을 관측자료의 분석을 통해 확인한 바 있다. 그러나 이러한 관계가 유도된 지역을 넘어 일반적으로 적용될 수 없다는 점에 유의할 필요가 있다(Hutchinson, 1995). 이와 관련한 이론적인 연구로서 Katz(1996) 또는 Wilks(1999b) 등이 있다.

6. 기 타

이상과 같이 살펴본 기상모의모형은 충분한 정도를 확보하고 있는 것은 아니며 아직 개선의 여지가 많다. 특히 다지점 또는 다차원의 기상자료 모의를 위한 간단한 추계학적 모의모형의 개발 또는 개선이 여전히 필요한 상황이다. 이를 위해서는 지점간 공간상관이나 기상인자들의 시-공간적 변동특성이 보다 정교하게 정량화 될 수 있어야 한다(Bardossy와 Plate, 1992). 그러나, 특히 강우의 경우에, 강우의 간헐성(intermittency)이 고려된 시-공간적 정량화는 이론적인 연구를 진행중인 상태에 있다(Yoo와 Ha, 2007).

기상인자들이 보여주는 장기간의 경년변동을 어떻게 고려할 것인가도 숙제로 남아있는 부분이다. 특히

관측자료의 제한으로 인해 이러한 특성을 정량화 하는 것 자체에도 어려움이 있으며, 이러한 특성을 모의할 보다 정교한 방법론의 개발도 여전히 진행중인 상황이다. 복원된 역사기록의 이용 등이 근대 관측자료의 부족을 어느 정도 보완해 줄 수 있을 것으로 보이며, 비선형 해석 및 모형의 개발로 이러한 자료의 특성화 및 모의가 어느 정도 가능할 것이다.

마지막으로 강우를 포함한 기상인자의 정량화가 모수적으로 이루어 지고 있다는 점을 극복할 필요가 있다. 이는 익히 알려진 확률밀도함수에 특정 기상인자의 특성이 환벽하게 부합한다는 가정에 근거한다. 그러나 특히 장기적인 거동특성의 경우에 그러한 가정이 맞지 않을 가능성이 매우 크다. 따라서 관측자료가 가지고 있는 특성을 그대로 보전하는 방향으로 자료모의를 하는 방법이 제시되고 있다. 가장 간단한 방법으로 Efron(1982)의 'Bootstrap' 기법을 들 수 있다. 그러나 이 방법은 모의된 자료간의 독립성이 전제된 것으로 특히 시간적인 상관특성의 보존이 어렵다. 이러한 문제점은 Young(1994), Lall과 Sharma(1996), Rajagopalan 등(1997) 등의 연구에서 어느 정도 보완되었다. Bardossy(1998)도 'simulated annealing' 이라는 기법을 제시하여 이러한 문제점의 극복을 시도한 바 있다.

앞으로도 기상모의모형은 다양한 분야에 다양한 목적을 가지고 적용될 것이다. 그러나 현재 일반적으로 사용되는 모의모형은 대부분이 매우 간단한 추계학적 모형 및 회귀식에 의존하고 있다는 점에 유의할 필요가 있다. 특히 다변량 또는 다차원 강우장의 시-공간적 변동특성이나 장기간의 경년변동특성 등은 이러한 기상모의에 적용하기에는 아직 해결해야 할 기술적인 문제점이 많다. 따라서, 모의된 기상자료가 이러한 한계를 가지고 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

관측된 자료에 근거하여 기상모의모형을 구성하여 이용하는 경우에도 모의된 자료는 단지 현재의 기상상태를 평균적으로 대변하고 있을 뿐이라는 점에 유의해야 한다. 특히 홍수나 가뭄과 같은 보다 극단적인 상황의 재현에 중요하게 고려되어야 할 기상인자의 경년변동이나 공간적인 변동특성은 매우 제한적으로 밖에 고려되지 않는다. 따라서 모의된 기상자료를 입력으로 하는 분석도 그 결과를 크게 신뢰하기 어렵다. 이러한 이유로 많은 관련 연구에 있어 모의된 자료를 하나의 기상 시나리오 정도로 취급하는 것이다. 기후변화 등을 고려하여 모의된 미래의 기상상태는 더욱 더 시나리오로 밖에 취급될 수 없는 것이 아직까지의 현실이다.

7. 사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

Bardossy, A. (1998). "Generating precipitation time series using simulated annealing." Water Resources Research, Vol. 34, pp. 1797-1744.

Bardossy, A., and Plate, E.J. (1992). "Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns." Water Resources Research, Vol. 28, pp. 1247-1259.

Besson, L. (1924). "On the probability of rain." Monthly Weather Review, Vol. 52, pp. 308.

Buishand, T.A. (1977). Stochastic modeling of daily rainfall sequences, Medelinges Landbouwhogeschool Wageningen. pp. 77-80.

Buishand, T.A. (1978). "Some remarks on the use of daily rainfall models." Journal of Hydrology, Vol. 36, pp. 295-308.

Chin, E.H., and Miller, J.E. (1980). "On the conditional distribution of daily precipitation amounts." Monthly Weather Review, Vol. 108, pp. 1462-1464.

Cochran, W.G. (1938). "An extension of Gold's method of examining the apparent persistence of one type of weather." Quanterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 64, pp. 631-634.

Efron, B. (1982). The jackknife, the Bootstrap, and other resampling plans, Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Favis-Mortlock, D.T., Boardman, J., and Bell, M. (1997). "Modelling long-term anthropogenic erosion of a loess cover: South Downs, UK." The Holocene Vol. 7, pp. 77-89.

Foufoula-Georgiou, E., and Lattenmaier, D.P. (1987). "A Markov renewal model for rainfall occurrences." Water Resources Research, Vol. 23, pp. 875-884.

Friend, A.D., Stevens, A.K., Knox, R.G., and Cannell, M.G.R. (1997). "A process-based terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics." Ecological Modelling, Vol. 95, pp. 249-287.

Gabriel, K.R., and Neumann, J. (1962). "A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 88, pp. 90-95.

Geng, S., Penning de Vries, F.T.W., and Supit, I. (1986). "A simple method for generating daily rainfall data." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 36, pp. 363-376.

Gold, E. (1929). "Note on the frequency of occurrence of sequences in a series of events of two types." Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 55, pp. 307-309.

Gregory, J.M., Wigley, T.M.L., and Jones, P.D. (1993). "Application of Markov Models to area-average daily precipitation series and interannual variability in seasonal totals." Climate Dynamics, Vol. 8, pp. 299-310.

Guttorp, P. (1995). Stochastic modeling of scientific data, Chapman & Hall, London.

Hanson, C.L., Cumming, K.A., Woolhiser, D.A., and Richardson, C.W. (1994). Microcomputer program for daily weather simulation in the contiguous United States (ARS-114). Washington, DC: US Department of Agriculture.

Hayhoe, H.N. (1998). "Relationship between weather varialbles in observed and WXGEN generated data series." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 90, pp. 203-214.

Hershfield, D.M. (1970). "A comparison of conditional and unconditional probabilities for wet- and dry-day sequences." Journal of Applied Meteorology, Vol. 9, pp. 825-827.

Hutchinson, M.F. (1986). "Methods of generation of weather sequences." Agricultural environments. Edied by Bunting, A.H., Wallingford, CAB International, pp. 127-138.

Hutchinson, M.F. (1995). "Stochastic space-time models from ground-based data." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 73, pp. 237-264.

Jones, P.G., and Thornton, P.K. (1997).

"Spatial and temporal variability of rainfall related to a third-order Markov model." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 86, pp. 127-138.

Katz, R.W. (1977). "Precipitation as a chain-dependent process." Journal of Applied Meteorology, Vol. 16, pp. 671-676.

Katz, R.W. (1983). Probabilistic models, Probability, statistics, and decision making in the atmospheric sciences. Edited by Murphy, A.H., and Katz, R.W. Boulder, CO Westview Press, pp. 261-288.

Katz, R.W. (1996). "Use of conditional stochastic models to generate climate charge scenarios." Climatic change, Vol. 32, pp. 237-255.

Katz, R.W., and Parlange, M.B. (1993). "Generalization of chain-dependent processes: application to hourly precipitation." Water Resources Research, Vol. 31, pp. 1311-1341.

Katz, R.W., and Parlange, M.B. (1998). "Over-dispersion phenomenon in stochastic modeling of precipitation." Journal of Climate, Vol. 11, pp. 591-601.

Lall, U., and Sharma, A. (1996). "A nearest-neighbor bootstrap for resampling hydrological time series." Water Resources Research, Vol. 32, pp. 679-693.

Mearns, L.O., Kartz, R.W., and Schneide, S.H. (1984). "Extreme high-temperature events: changes in their probabilities with changes in mean temperature." Journal of Applied Meteorology, Vol. 23, pp. 1601-1613.

Newnham, E.V. (1916). "The persistence of wet and dry weather." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 42, pp. 153-162.

Nonhebel, S. (1994). "The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation models." Agricultural System, Vol. 44, pp. 377-396.

Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M. (1991). "A serial approach to local stochastic weather models." Ecological Modelling, Vol. 57, pp. 27-41.

Rajagopalan, B., Lall, U., Tarboton, D.G., and Bowles, D.S. (1997). "Multivariate non-parametric resampling scheme for generation of daily weather variables." Stochastic Hydrology and Hydraulics, Vol. 11, pp. 65-93.

Richardson, C.W. (1981). "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation." Water Resources Research, Vol. 17, pp. 182-190.

Richardson, C.W. (1985). "Weather simulation for crop management models." Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 28, pp. 1602-1606.

Roldan, J., and Woolhiser, D.A. (1982). "Stochastic daily precipitation models. 1. A comparison of occurrence processes." Water Resources Research, Vol. 18, pp. 1451-1459.

Stern, R.D., and Coe, R. (1984). "A model fitting analysis of daily rainfall data." Journal of the Royal Statistical Society Series A, Vol. 147, pp. 1-34.

Todorovic, P., and Woolhiser, D.A. (1975). "A stochastic model of n-day precipitation." Journal of Applied Meteorology, Vol. 14, pp. 17-24.

Valdes, J.B., Seoane, R.S., and North, G.R. (1994). "A methodology for the evaluation

of global warming impact on soil moisture and runoff." Journal of Hydrology, Vol. 161, pp. 389-413.

Wallis, T.W.R., and Griffiths, J.F. (1997). "Simulated meteorological input for agricultural models." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 88, pp. 241-258.

Wilby, R.L. (1994). "Stochastic weather type simulation for regional climate change impact assessment." Water Resources Research, Vol. 30, pp. 3395-3403.

Wilby, R.L. (1998). "Statistical downscaling of daily precipitation using daily ariflow and seasonal teleconnection indices." Climate Research, Vol. 10, pp. 163-178.

Wilby, R.L., Greenfield, B., and Glenny, C. (1994). A coupled synoptic-hydrological model for climate change impact assessment." Journal of Hydrology, Vol. 153, pp. 265-290.

Wilks, D.S. (1989). "Conditioning stochastic daily precipitation models on total monthly precipitation." Water Resources Research, Vol. 25. pp. 1429-1439.

Wilks, D.S. (1999a). "Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models." Agricultural and Forest Meteorlogy, Vol. 93, pp. 153-169.

Wilks, D.S. (1999b). "Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator." Climate Research, Vol. 11, pp. 125-136.

Williams, C.B. (1952). "Sequences of wet and of dry days considered in relation to the logarithmic series." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 78, pp. 91-96.

Young, K.C. (1994). "A multivariate chain model for simulating climatic parameters from daily data." Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, pp. 661-671.

Yoo and Ha (2007). "Effect of zero measurements on the spatial correlation structure of rainfall." Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 21, pp. 289-297.