최근의 강우유출특성이 반영된 장기유출 모의를 위한 장기강우 사상의 모의기법 개발

Development of a Long-term Rainfall Generation Method for Long-term Runoff Simulations Considering the Recent Rainfall-Runoff Characteristics

이정호* · 류성수** · 김중훈*** · 전환돈****

Lee, Jung Ho · Ryu, Seong Su · Kim, Joong Hoon · Jun, Hwan Don

Abstract

To perform a long-term simulation which can be used for the estimation of annual runoff or other analyses, a long-term rainfall-runoff simulation relies on a continuous daily- or monthly-rainfall data. For this purpose, sufficient observed rainfall time series data must be used to satisfy the reliability of runoff analysis. In Korea, many rainfall stations have enough observed rainfall data for the reliable statistical analysis. However, as the characteristics of rainfall change due to urbanization and climate change, using all the rainfall data including older ones may average out their effects. Therefore, in this study, the year of the rainfall characteristic change was determined by the statistical analysis, and the long-term rainfall data was then generated by the Neyman-Scott model using the more recent rainfall data after the year of the rainfall characteristic change. For the observed rainfall data of 48 years(1961~2008), the Year 1990 was determined as the year of the rainfall characteristic change. Based on this finding, the 100-year daily-rainfall time series were generated by the Neyman-Scott model using the rainfall data observed from 1990 to 2008. Finally, the simulated daily-rainfall time series were verified for the statistical reliability by comparing with the more recent observed data.

Key words : long-term rainfall, Neyman-Scott model, climate change

요 지

연간 유출량 산정과 같은 장기간 분석에서는 연속적인 강우자료를 이용하여 장기 유출이 모의되어야 한다. 그리고 장기 유출 모의에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 충분한 자료계열이 이용되어야 한다. 국내의 경우 장기간의 관측 강우자료들이 존재하여 통계적 분석을 위한 신뢰성을 확보할 수 있다. 그러나 최근 도시화와 기후변화 등으로 강우의 특성이 변화하고 있으므로 수문학적 분석에 있어서 이에 대한 고려가 이루어져야 할 것이다. 이에 있어서 관측된 장기간의 강우자료를 그대로 사용할 경우 최근의 강우 특성 변화를 고려하지 못하는 문제점이 있으며, 반면 최근의 단기간 강우자료를 이용할 경우 통계적 분석의 신뢰성을 확보하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 통계적 분석을 통하여 최근의 강우 특성이 변화하는 변동 기준년을 선정하였으며, 기준년 이후의 단기간 강우자료에 대하여 Neyman-Scott 모형을 이용하여 장기간의 강우자료를 발생시켰다. 분석 결과 강우의 특성이 변화되는 변동 기준년은 1990년으로 결정되었다. 이것은 최근의 강우특성을 반영하는 한편, 통계적 신뢰성을 확보하기 위한 것으로 본 연구에서는 서울지방의 48개년(1961~2008년)의 관측 강우자료를 이용하였다. 강우특성의 변화에 대한 분석 결과 변동 기준년을 1990년으로 설정하였으며, 1990년 이후 19개년(1990~2008년)의 단기간강우자료를 이용하여 100년의 장기 강우 모의를 하였다. 또한 단기 실측강우와 모의 강우간 비교 분석을 통하여 발생 강우자료의 적정성을 검증하였다.

핵심용어 : 장기 강우, Neyman-Scott Model, 기후변화

1. 서 론

일반적으로 수문학적 분석에서는 독립강우사상의 분석을 통하여 산정된 설계강우가 이용되는 반면, 물순환 분석, 유황곡

선 작성, 연간 유출량 산정 등과 같은 장기적 분석에서는 연속적인 강우자료를 이용하여 장기 유출을 모의하는 것이 바람직하다. 그리고 장기 유출을 모의할 경우 결과에 대한 통계적 분석을 실시하기 위해서는 충분한 수의 자료를 이용하

*정회원 · 한밭대학교 토목공학과 전임강사 (E-mail : leejh@hanbat.ac.kr)

**정회원 · (주)하존이앤씨 수자원부 대리

***정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

****정회원 · 서울과학기술대학교 건설공학부 조교수 (교신저자)

여야 하며, 자료가 충분하지 못할 경우 통계적 분석 결과의 신뢰성이 감소하게 된다.

국내의 경우 30년 이상의 장기간 강우자료를 보유하고 있는 강우관측소가 존재하며, 이를 이용할 경우 통계학적 분석을 위한 자료의 수는 충분하다고 할 수 있다. 그러나 최근 기후변화와 도시화의 영향으로 강우 특성이 변화하고 있다는 다양한 연구결과가 나오고 있으며, 따라서 장기간의 축적된 강우자료가 있다 할지라도 자료의 이용을 제한적으로 만들게 된다. 즉, 모든 기간의 자료를 사용한다면 유출을 모의할 때 최근의 강우특성을 제대로 반영할 수 없으며, 반대로 유출 모의 시에 최근의 강우특성을 반영하기 위해 최근의 강우자료만을 이용하는 것은 분석 결과에 대한 통계적 신뢰성을 확보할 수 없는 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 최근의 변화된 강우특성에 대한 분석을 통하여 최근 그 경향성이 두드러진 강우자료를 전기간 강우자료로부터 분리하였으며, 분리된 강우자료에 대한 통계적 분석의 신뢰성을 확보하기 위하여 Neyman-Scott 모형을 이용하여 장기간의 강우 분석 결과를 도출하여 이를 실측 강우자료의 통계적 특성과 비교 분석하였다.

2. Neyman-Scott 모형

강우모형은 실제 강우를 수학적인 분석을 통해 강우가 지닌 특성을 재현하는 가상의 강우를 발생시킨다. 1970년대 후반부터 강우현상을 설명하기 위해 많은 연구가 진행되었으며, 1980년대 이후에는 수문학적 분석을 위한 시강우 발생의 다양한 연구가 진행되었다. 강우모형은 적용 범위에 따라 시간적 특성만을 고려하는 point rainfall model과 시·공간적 특성을 모두 고려하는 multi-dimension rainfall model로 구분할 수 있다. 또한 강우발생 구조에 따라 empirical statistical model, dynamic meteorological model, stochastic model로 구분할 수 있으며, 일반적으로 stochastic model이 타 모형에 비해 재현성이 우수한 것으로 알려져 있다(Onof et al., 2000).

Stochastic model 중에서 대표적인 point rainfall model인 Neyman-Scott rectangular pulses model(NSRPM)은 매개변수의 수가 5개로 비교적 적은 편이며 매개변수의 추정이 용이하다. 그리고 강우의 대표적인 특징인 군집성을 고려할 수 있으며, 재현성이 우수하며 김기욱 등(2008)의 연구를 통하여 강우의 장기 모의에 적합한 것으로 알려져 있다.

Neyman-Scott 모형(Neyman-Scott Rectangular pulses Poisson process Model, NSRPM)은 Rodriguez-Iturbe et al.(1987)에 의해 제안된 모형으로 Neyman-Scott 점과정에 의해 강우발생을 모의한다. 5개의 비교적 적은 매개변수를 가지고 있으며 매개변수의 추정 또한 비교적 용이하며, Neyman-Scott 모형에 의한 모의 강우 발생 개념은 그림 Fig. 1과 같다.

NSRPM은 Table 1과 같이 강우사상의 발생(λ)과 강우세포의 위치(β), 평균 강우세포 개수 (μ_c), 강우강도(μ_k), 지속시간(η)에 관련된 5개의 매개변수로 구성되어 있으며, 각각의 매개변수는 상호 독립적이다. 여기서 강우사상은 Poisson process를 따르며, 강우세포의 위치, 강우강도, 강우지속시간의

Fig. 1. A scheme of NSRPM (Rodriguez et al. 1987)

Table 1. Parameters of NSRPM

Parameter	Variable	Distribution
λ	Storm origin	Poisson process
β	Raincell distribution	Exponential dist.
μ_c	Number of raincell	Poisson / Geometric dist.
η	Duration of raincell	Exponential dist.
μ_k	Intensity of raincell	Exponential dist.

매개변수는 Exponential 분포를, 평균 강우세포 수는 Poisson 분포 또는 Geometric 분포를 따른다.

NSRPM에 의한 강우의 발생 절차는 다음과 같다.

- 1) 매개변수 λ 를 따르는 Poisson process에 의해 강우사상이 발생된다.
- 2) 각 강우사상은 매개변수 μ_c 를 따르는 Exponential distribution에 의해 임의의 강우세포를 가지게 된다.
- 3) 각 강우사상 내에서 강우세포의 위치는 매개변수 β 를 따르는 Exponential distribution을 따른다.
- 4) 각 강우세포들은 매개변수 η , μ_k 를 따르는 Exponential distribution에 따라 지속시간과 강도가 결정된다.
- 5) 동시간대에 활성화된 강우세포들을 결합하여 구형펄스 형태의 강우를 발생시킨다.

모형의 매개변수는 식 (1)~(3)과 같이 매개변수의 조합으로 표현된 식을 통해 추정할 수 있다. 식의 좌항은 실측강우자료의 집성시간별 평균, 분산, 공분산 등의 통계치이다. 5개의 매개변수를 추정하기 위해서는 5개의 통계식이 필요하며 이에 따라 일반적으로 다른 2개의 집성시간으로부터 1개의 평균, 각 2개의 분산, 공분산 식을 이용한다. 집성시간은 강우의 구성시간을 의미한다. 예를 들어 집성시간 6시간 및 12시간은 각각 6시간, 12시간 동안의 강우량의 합을 의미한다. 집성시간의 선택에 대한 절대적인 기준은 없으며, 일반적으로 1 hr~6 hr, 1 hr~12 hr, 1 hr~24 hr을 이용한다.

$$E[Y_i(\tau)] = \lambda \eta^{-1} \mu_c \mu_k^T \quad (1)$$

$$Var[T_i(\tau)] = \lambda \eta^{-3} (\eta \tau - 1 + e^{-\eta \tau}) \quad (2)$$

$$\left(2\mu_c \cdot 2\mu_k^2 + (\mu_c^2 + 2\mu_c) \mu_k^2 \cdot \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right) - \lambda (\beta \tau - 1 + e^{-\beta \tau}) \frac{\mu_c^2 + 2\mu_c}{\beta(\beta^2 - \eta^2)}$$

$$\text{Cov}[Y_i(\tau), Y_{i+k}(\tau)] = \quad (3)$$

$$\lambda \eta^{-3} (1 - e^{-\eta \tau})^2 e^{-\eta(k-1)\tau} \left(2\mu_c \mu_x + \frac{1}{2} \frac{(\mu_c^2 + 2\mu_c) \mu_x^2 \beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right) - \lambda (1 - e^{-\beta \tau})^2 \cdot e^{\beta(k-1)\tau} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{(\mu_c^2 + 2\mu_c) \mu_x^2}{\beta(\beta^2 - \eta^2)}, (k \geq 1)$$

여기서, $E[Y_i(\tau)]$, $Var[Y_i(\tau)]$, $Cov[Y_i(\tau), Y_{i+k}(\tau)]$ 는 집성시간 τ 의 평균, 분산, 공분산을 의미한다.

3. 강우특성 변화 분석

본 연구에서는 기후변화로 인하여 달라지고 있는 강우특성을 반영하여 장기 강우를 모의하고자 한다. 따라서 강우의 특성 변화에 따른 최근의 강우경향을 반영하고자 할 때, 최근 몇 년의 강우자료를 바탕으로 하여야 할 것인지에 대한 분석이 선행되어야 한다. 이것은 수문학적 분석에 있어서 강우에 의한 유출에 미치는 영향이 절대적이므로, 보다 정확한 유출 해석을 위해서는 최근의 강우 특성에 대한 반영이 반드시 필요하기 때문이다.

강우의 변화에 따른 유출에 미치는 영향과 관련하여 Mohseni and Stefan(1998)은 기후변화에 따른 유출량의 민감도 분석을 수행하여 강우량의 20% 증가 시 연평균 유출량은 35% 정도 증가한다는 연구결과를 발표했다. 이는 강우특성의 변화가 유출의 변화에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주

는 결과이다. 이 연구결과는 수문학적 분석에서는 강우자료의 선택이 더욱 중요해졌음을 의미한다. 왜냐하면 유출은 입력자료인 강우자료에 큰 영향을 받기 때문이다. 국내에서도 강우 특성 변화에 관한 다양한 연구가 진행되었다. 김광섭 등(2005)은 25개 지상관측지점의 강우자료를 분석한 결과 강우일수는 감소하였으나 연강우량은 증가하고, 도시지역에서의 변화가 비도시지역에 비해 더 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 유철상 등(2007)은 도시화의 간접분석을 실시한 결과를 바탕으로 도시화는 극한호우사상에 상당한 영향을 끼치며 도시화에 의한 강우특성의 변화는 앞으로도 계속될 것이라고 판단하였다. 국내의 연구결과를 통해 한국에서도 강우특성이 변화되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 국내에서도 수문학적 분석 시 강우특성의 변화가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 최근 강우의 변화 특성을 고려하여 전기간 강우관측자료의 변동 기준년을 제시함으로써 기준년 이후의 단기강우자료와 기준년 이전을 포함한 장기강우자료로 구분하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 이동평균, 전 기간 평균 강우량 대비 기간 평균 강우량, 임의 기준년 전·후 평균 강우량 등 세 가지 분석을 실시하였으며, 분석 결과를 바탕으로 강우특성이 과거자료와는 확연히 구분되는 년을 변동기준점으로 결정하였다. 대상 강우는 서울기상청의 48개년(1961~2008) 자료를 이용하였다.

먼저 연평균강우량의 5, 10, 15년 이동평균을 산정하여 변화추이를 분석한 결과, Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 전체적으로 1980년 이후 증가하고 있음을 확인하였다. 특히 1980

(a) Moving average of annual rainfall

(b) Period mean rainfall

(c) Mean rainfall before and after random n year

Fig. 2. Rainfall characteristics change

년대 중반 이후에는 증가양상이 뚜렷한 것으로 나타났다.

또한 전기간 평균강우량(1961~2008) 대비 임의 n년 이후의 평균강우량(n-2008)의 비를 산정하여 그 변화를 살펴보았다(Fig. 2(b)). 1980년대 이후 강우량의 비가 증가하는 모습을 보이며, 1990년 이후 전기간 평균 대비 약 10%이상 큰 것으로 나타났다. 이 후에는 지속적인 증가추세를 나타내고 있다.

마지막으로 임의 n년을 선정하여 n년 이전과 이후의 평균 강우량을 비교하여 그 차이를 살펴보았다. Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 임의 n년 이전의 평균강우량은 최근으로 올수록 감소하고 있으며, 임의 n년 이후의 평균강우량은 증가하고 있는 것으로 나타났다. 전·후 강우량의 차이를 비교한 결과, 1980년대 중반 이후에 그 차이가 크게 증가하였으며 약

200 mm 정도의 강우량 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 이동평균, 임의 n년 이후의 평균강우량 및 임의 n년 전·후의 평균강우량을 비교 분석 결과를 바탕으로 1990년 이후의 강우특성이 과거와는 확연히 구분되는 것으로 판단하여 강우특성의 변동점을 1990년으로 결정하였다.

4. 장기 강우 모의 분석

앞서 설명한 바와 같이 전기간의 관측 강우자료를 이용할 경우 유출 해석에 있어서 최근의 강우 특성을 제대로 반영할 수 없으며, 반면 서울지방에서의 1990년 이후의 단기간 강우 자료만을 이용할 경우 자료의 수가 충분하지 못하므로 모의

Table 2. Historical statistics for different aggregation level (April-October)

Month	Aggregation level	Mean	Variance	Covariance	P_{dry}	P_{DD}	P_{WW}
April	1	0.1052	0.3737	0.2335	0.9311	0.9171	0.0550
	6	0.6313	7.7735	3.5009	0.8794	0.8314	0.0735
	12	1.2625	22.2194	6.0213	0.8353	0.7431	0.0745
	24	2.5251	53.8591	6.9593	0.7412	0.5922	0.1118
May	1	0.1525	0.8672	0.5706	0.9146	0.8960	0.0670
	6	0.9147	17.3530	9.1440	0.8496	0.7970	0.0987
	12	1.8294	55.8255	15.6497	0.7998	0.7078	0.1091
	24	3.6588	141.7593	14.1224	0.7040	0.5389	0.1290
June	1	0.2186	1.8299	1.1030	0.9055	0.8832	0.0722
	6	1.3118	35.2444	12.3087	0.8260	0.7618	0.1093
	12	2.6236	94.5198	21.9377	0.7637	0.6559	0.1284
	24	5.2473	216.7813	41.2261	0.6588	0.4902	0.1706
July	1	0.5453	8.0343	4.7074	0.8345	0.7951	0.1263
	6	3.2716	140.8730	45.8801	0.7120	0.6167	0.1935
	12	6.5433	369.4107	98.3841	0.6186	0.4810	0.2457
	24	13.0865	959.2893	147.5662	0.4782	0.3055	0.3510
August	1	0.5454	9.5475	5.1921	0.8050	0.7443	0.1347
	6	3.2726	170.7872	48.3070	0.7481	0.6589	0.1637
	12	6.5452	447.2669	127.9908	0.6689	0.5436	0.2078
	24	13.0903	1162.8544	355.6909	0.5446	0.3700	0.2846
September	1	0.2280	2.5308	1.5128	0.9231	0.9044	0.0581
	6	1.3682	50.6274	21.8483	0.8525	0.7946	0.0892
	12	2.7364	148.9217	54.1952	0.7931	0.6712	0.1039
	24	5.4727	387.3620	120.2500	0.6902	0.5157	0.1333
October	1	0.0659	0.3271	0.1965	0.9585	0.9476	0.0308
	6	0.3956	6.4992	2.0615	0.9156	0.8743	0.0441
	12	0.7913	17.3745	2.7602	0.8767	0.8017	0.0503
	24	1.5825	36.7565	3.7826	0.8065	0.6774	0.0683

Table 3. Limit values of parameters (NSRPM)

Limits	Parameters				
	λ	β	η	μ_c	μ_k
Minimum	0.001	0.01	0.1	2.0	0.3
Maximum	0.050	0.50	5.0	100.0	15.0

Table 4. A comparison of general rainfall properties

	Observed rainfall		Simulated rainfall (using NSRPM)
	Long-term rainfall data (1961-2008)	Short-term rainfall data (1990-2008)	
Annual mean rainfall	1,247.6 mm	1,371.3 mm	1,387.7
Maximum annual rainfall	2,230.7 mm	2,230.7 mm	2,754.7
Minimum annual rainfall	661.0 mm	927.7 mm	382.0
Maximum rainfall intensity	112.0 mm/hr	90.0 mm/hr	94.0

(a) Short-term observed rainfall data

(b) Simulated rainfall data

Fig. 3. A comparison of rainfall intensity distributions

(a) Mean

(b) Variance

(c) Probability of dry periods

Fig. 4. A comparison of statistical properties

결과에 대한 통계적 분석의 신뢰성이 낮아질 수밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 1990년을 기준으로 최근의 서울지방 강우자료에 대하여 그 신뢰성을 확보하기 위하여 NSRPM을 이용하여 장기간의 강우자료를 모의하였다.

대상 강우자료는 서울지방기상청의 1961~2006년의 4~10월까지의 강우자료를 이용하였다. 11~3월까지는 시장우자료의 부재로 분석에서 제외되었다. 비교 분석을 위한 대상 강우는 48개년(1961~2008) 장기 실측강우, 19개년(1990~2008) 단기 실측강우, 단기 실측강우의 특성을 재현한 모의강우이다.

모의강우는 NSRPM을 이용하여 100년간의 강우자료를 발생시켰으며, 계절적인 강우 특성의 차이를 고려하기 위하여

월별로 구분하여 매개변수를 추정하였다. NSRPM의 매개변수 추정을 위하여 산정된 단기 실측강우의 통계치는 평균, 분산, 공분산이며, 모의강우의 재현성을 검토하기 위하여 무강우확률(P_{dry}), 연속강우확률(P_{WW}), 연속무강우확률(P_{DD})도 추가적으로 산정하였다. 통계치 산정 결과는 다음의 Table 2와 같다.

Table 2의 실측강우 통계치와 식 (1)~(3)을 이용한 월별 매개변수를 추정하였으며, 집성시간은 1 hr~6 hr, 1 hr~12 hr, 1 hr~24 hr 세 가지 조합을 적용하였고, 추정된 매개변수는 Table 3과 같다.

모의강우와 실측강우의 특성치를 Table 4에 비교하였다. 연

Fig. 5. A comparison of correlations for rainfall factors

평균강우량과 최대강우강도는 단기 실측강우와 유사하며, 강우량 발생범위는 더욱 넓게 분포되어 다양한 강우사상을 발생시킨 것으로 보인다.

Fig. 3은 단기 실측강우와 모의강우의 강우강도 분포를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우강도의 분포 실측강우와 유사하게 나타난 것을 볼 수 있다. 강우자료의 통계특성치와 강우인자간 상관성을 비교하여 Fig. 4와 Fig. 5에 기재하였다. 무강우확률은 실측강우보다 다소 높게 산정되었다. 이는 군집성이 다소 높게 고려되는 NSRPM이 가진 본래의 특성으로 인한 것이다. 그러나 전체적으로 통계특성 및 상관성 등이 실측강우의 특성을 적절히 재현하였다.

5. 결 론

본 연구에 의한 분석 결과 서울의 경우 1990년 이후의 강우특성이 이전과는 뚜렷한 차이를 가지고 있는 것으로 나타났다. 전기간 강우자료를 48년치(1961~2008) 장기 강우자료와 19년치(1990~2008) 단기 강우자료로 구분할 경우 장기 강우자료의 적용은 최근의 변화된 강우특성을 적절히 반영할 수 없으며, 반면 단기 강우자료는 짧은 자료기간으로 인하여 모의결과의 불확실성이 커지는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Neyman-Scott 모형을 이용하여 최근의 강우특성을 반영한 100년치의 모의강우를 발생시켰다. 통계치의 분석 결과 모의된 장기강우는 실측 단기강우의 특성을 적절히 반영하고 있으며, 모의를 통하여 충분한 자료계열을 확보할 수 있으므로 통계적 신뢰성을 확보할 수 있다. 따라서 본 연구의 모의강우자료는 다양한 수문학적 분석에서 최근의 강우특성을 반영하고자 할 때 적절히 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 복합지하공간 수해 방지를 위한 저류공동 건설기술 개발 사업의 연구비지원(10기술혁신E04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김기욱, 유철상 (2008) 시간적 군집특성을 고려한 강우모의모형의 선정, **한국수자원학회논문집**, 제41권, 제7호, pp. 747-759.
- 김광섭, 임태경 (2005) 도시화 등 환경변화에 따른 지역기후변화 특성 분석, **2005 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, pp. 912-915.
- 유철상, 김대하, 박상형, 김병수, 박창열 (2007) 서울지점 강우자료에 나타난 도시화의 간접 분석, **한국수자원학회 논문집**, 제40권, 제8호, pp. 629-641.
- Mohseni, O. and Stefan, H.G. (1998) A monthly streamflow model, *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 1287-1298.
- Onof, C., Chandler, R.E., Kakou, A., Northrop, P., Wheeler H.S., and Isham V. (2000) Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: A review of developments, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 14, No. 6, pp. 384-411.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., and Isham, V. (1987) Some models for rainfall based on stochastic point processes, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 410, No. 1839, pp. 269-288.

◎ 논문접수일 : 11년 06월 17일

◎ 심사의뢰일 : 11년 06월 20일

◎ 심사완료일 : 11년 06월 29일